



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

NÁVRH FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY S BATERIOVÝM ÚLOŽIŠTĚM PRO FIRMU

DESIGN OF A PHOTOVOLTAIC SYSTEM WITH BATTERY STORAGE FOR A COMPANY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Šmatlo

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Filip Šmatlo

ID: 173757

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Návrh fotovoltaické elektrárny s bateriovým úložištěm pro firmu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem fotovoltaického děje a proveďte analýzu a rozbor používaných FV technologií pro výrobu FV článků. Proveďte rozbor technologií pro akumulátorové úložiště dle parametrů jednotlivých typů baterií. Zaměřte se na vyhodnocení trhu v ČR (výhody, dotace, podmínky, legislativa). V praktické části práce navrhnete řešení FVE + bateriové úložiště pro firmu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 30.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na návrh fotovoltaického systému pro firmu. V první části je rozebrána problematika výroby elektrické energie ze Slunce. Popsány jsou technologie výroby fotovoltaických článků a technologie jednotlivých komponent fotovoltaického systému. Dále jsou popsány koncepce fotovoltaických systémů a typy zapojení těchto systémů do distribuční sítě. Také je popsána legislativa ČR, recyklace a bezpečnost v oboru fotovoltaiky. V praktické části bakalářské práce je vytvořena fotovoltaická elektrárna umístěná na střeše budovy. Jsou popsány výsledky simulace fotovoltaického systému vytvořeného v návrhovém programu PVSOL.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fotovoltaika, sluneční energie, obnovitelný zdroj, PVSOL, akumulace

ABSTRACT

The bachelor thesis is focused on design of the photovoltaic system for the company. The first part describes electricity production from the sun. There are described technologies of production of photovoltaic cells and technology of individual component of photovoltaic system. Furthermore, the concepts of photovoltaic systems and types of connections of these systems to the distribution network are described. Also the Czech legislation, recycling and safety in the field of photovoltaics are described. In the practical part of the thesis is created photovoltaic power station located on the roof of the building. Results of simulation of photovoltaic system created in PVSOL design program are described.

KEYWORDS

Photovoltaics, solar energy, renewable source, PVSOL, accumulation

ŠMATLO, F. *Návrh fotovoltaické elektrárny s bateriovým úložištěm pro firmu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2019. 41 s., 24 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh fotovoltaické elektrárny s bateriovým úložištěm pro firmu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.

V Brně dne: **22. května 2019**

.....

podpis

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace a podnětné návrhy k práci. Rád bych poděkoval všem konzultantům za poskytnutí odborných rad a poznatků při zpracování bakalářské práce. Hlavně bych chtěl poděkovat svým rodičům, kteří to se mnou nevzdali a podporovali mě při mém studiu.

OBSAH

ÚVOD.....	7
1 FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA	8
1.1 VYUŽITELNOST SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ	8
1.2 PŘEMĚNA SLUNEČNÍ ENERGIE	9
1.3 FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK.....	10
1.4 VÝVOJ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ.....	13
1.5 FOTOVOLTAICKÝ PANEL	14
1.6 STRÍDAČ	15
1.7 BATERIE A AKUMULACE	17
1.8 NABÍJECÍ REGULÁTOR.....	19
1.9 FOTOVOLTAICKÝ SYSTÉM.....	20
1.10 PŘIPOJENÍ FOTOVOLTAICKÉHO SYSTÉMU DO SÍTĚ	22
1.11 LEGISLATIVA ČR	24
1.12 ELEKTROTECHNICKÉ NORMY VDE A DIN	25
1.13 BEZPEČNOST.....	26
1.14 DOTACE.....	27
2 NÁVRH FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY.....	28
2.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY NÁVRHU	28
2.2 NÁVRHOVÝ SOFTWARE.....	28
2.3 PVSOL.....	29
2.4 FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA S BATERIOVÝM ÚLOŽIŠTĚM.....	30
2.5 VÝSLEDKY SIMULACÍ.....	35
3 ZÁVĚR	37
LITERATURA.....	38
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	40
SEZNAM OBRÁZKŮ	41
SEZNAM PŘÍLOH.....	41

ÚVOD

Dnešní moderní společnost se stává více a více závislá na elektrické energii. Pro většinu lidí začíná kontakt s elektrickou energií každé ráno budíkem a končí zhasnutím lampičky na nočním stolku. Přístup k elektrické energii je pro mnoho lidí už samozřejmost, ale velká spousta těchto lidí už nevidí samotný vliv výroby elektrické energie na jejich okolí.

Většina používané elektrické energie pochází z tepelných elektráren. Elektrická energie se v těchto elektrárnách vyrábí spalováním fosilních paliv a následnou přeměnou energie zahřáté páry na energii mechanickou pomocí rotační turbíny. Tento způsob výroby byl sice jejím častějším využíváním v posledních 50 letech vyvíjen a zdokonalován, ale jeho účinnost není a nikdy nejspíš nebude tak vysoká.

Alternativní výrobou elektřiny je využití obnovitelných zdrojů. Jedná se o zdroje běžně přístupné a při výrobě elektrické energie nedochází ke spotřebování žádného materiálu, tudíž nevzniká žádný odpadní produkt. Mezi tyto zdroje patří např. energie ze Slunce, energie z vody či větrná energie. Účinnost těchto metod není vždy dost vysoká, ale velkou výhodou je, že jakmile se jedna z těchto elektráren postaví a uvede do provozu, produkuje energii nepřetržitě (v případě, že jsou dostupné jejich zdroje) a je šetrná k životnímu prostředí.

V případě energie ze Slunce se objevuje jedna velká nevýhoda a sice, že Slunce nesvítí pořád. Tento nedostatek se pomalu začíná vytrácet mnohem častějším využíváním akumulace vyrobené energie pomocí baterií. V poslední době se vývoj baterií hodně posunul a jejich potenciál využití pro akumulaci elektrické energie stále roste.

1 FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA

1.1 Využitelnost slunečního záření

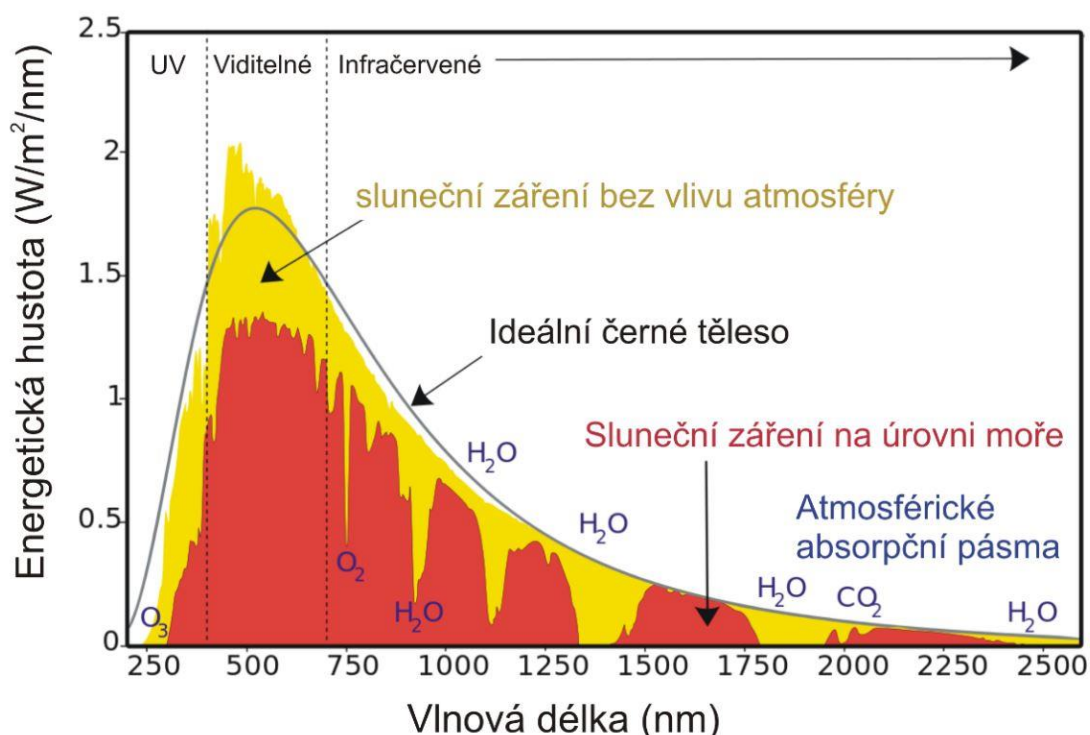
Slunce vyzařuje ve všech částech spektra, od rádiových vln po gamma záření. Lidské oko je citlivé pouze na viditelnou část spektra (750 až 400 nm). Viditelná část spektra obsahuje 45 % energie vyzářené ze Slunce. Hustota výkonu dopadajícího na vnější část atmosféry, označovaná jako solární konstanta, je asi 1360 Wm^{-2} . Velikost solární konstanty se v průběhu roku mění a závisí na vzdálenosti Země od Slunce [1].

Hustota výkonu označuje množství výkonu dopadajícího na čtvereční metr plochy. Rozložení výkonu ve slunečním spektru je přibližně následující:

- Infračervená část a výše ($\lambda > 750 \text{ nm}$) 46,3 %
- Viditelná část ($400 \text{ nm} < \lambda < 750 \text{ nm}$) 44,6 %
- Ultrafialová část a méně ($\lambda < 400 \text{ nm}$) 9,1 %

Na obrázku 1 můžeme vidět hustotu výkonu pro celé sluneční spektrum a vliv na velikost výkonu v různých částech atmosféry. Pro porovnání je na obrázku vyobrazeno výkonové spektrum ideálního černého tělesa o teplotě 5778 K [1].

Spektrum slunečního záření



Obrázek 1: Závislost výkonu záření na vlnové délce záření [2]

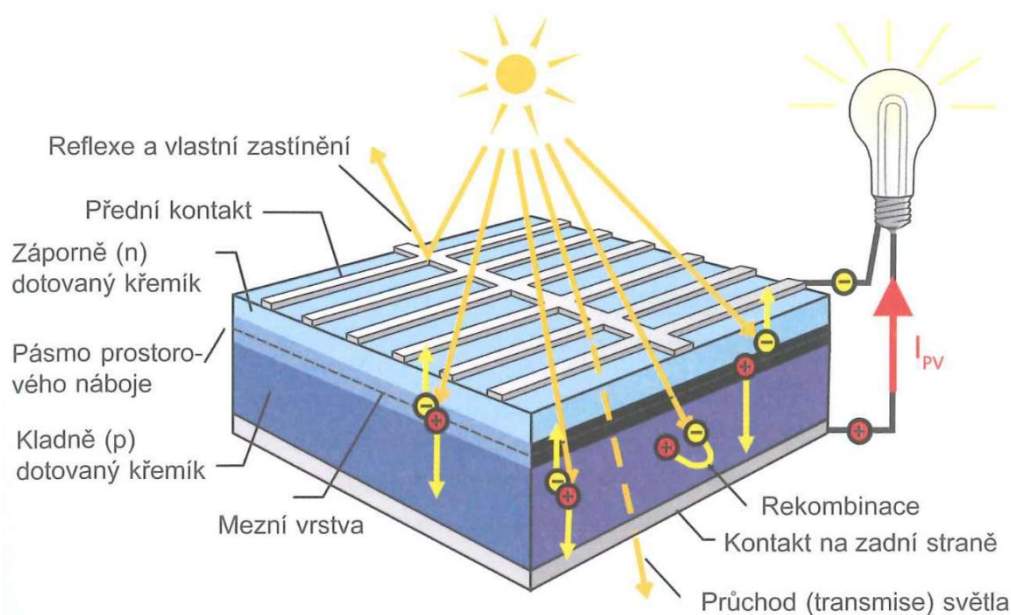
Atmosférickými plyny, vodní parou a prachovými částicemi dochází k rozptylu a odrazu slunečního záření. Tím se mění a v některých částech spektra i ztrácí výkon slunečního záření. Průměrný výkon dopadající na zemský povrch je asi 1000 Wm^{-2} [1].

1.2 Přeměna sluneční energie

Základní stavební element systému pro přímou přeměnu sluneční energie na energii elektrickou je solární článek. V solárním článku probíhá přímá přeměna slunečního záření na elektrickou energii. Tato přeměna se nazývá fotovoltaický (dále jen FV) jev a jeho objevitelem byl v roce 1839 francouzský fyzik Alexander Bequerel. Přeměna probíhá bez emisí a spotřeby látek v solárně aktivních materiálech, jedná se tedy o tzv. zelenou energii [3].

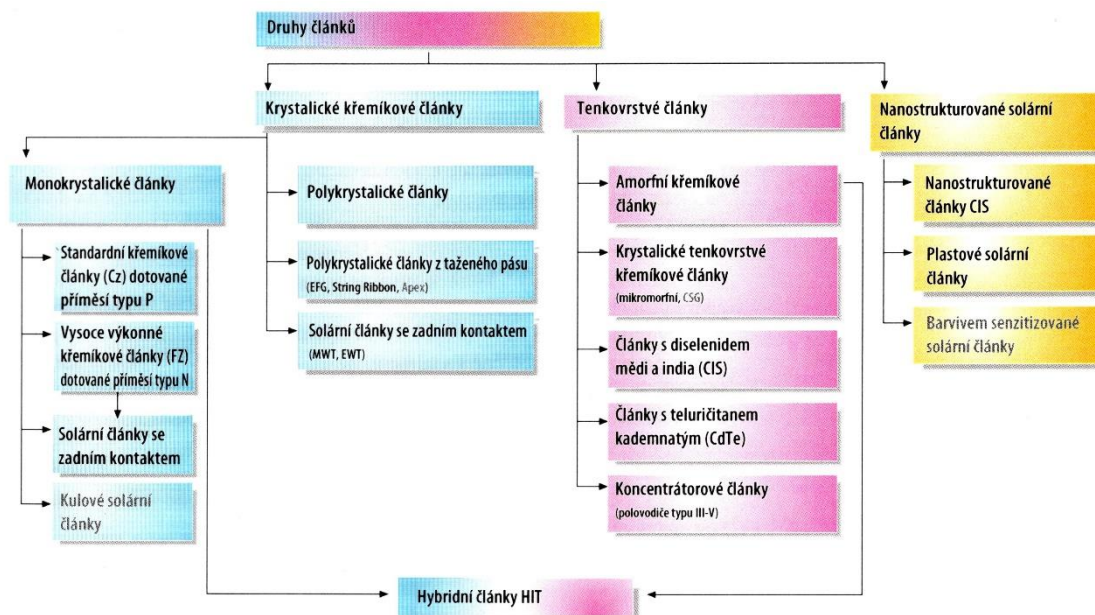
FV (solární) článek se skládá z polovodičů, z většiny se jedná o křemík. Polovodiče jsou látky, jejichž elektrická vodivost leží mezi vodivostí kovu a dielektrika. Přivedeme-li na polovodič potřebnou energii může se stát vodivým. V krystalické struktuře křemíku jsou 4 sousední křemíkové atomy vázány elektronovým párem. Tato struktura je dotována prvky III. (polovodiče P) nebo V. (polovodiče N) skupiny. V krystalické struktuře se dotováním těchto prvků vytvoří 2 odlišně vodivé oblasti. Mezi kladně dotovanou (P) a záporně dotovanou (N) oblastí vzniká elektrické pole, které je způsobeno difuzí volných elektronů z polovodiče N do polovodiče P v prostoru PN přechodu [3].

Při dopadu fotonu (částice světelného záření) se může jejich energie uvolňovat do struktury a dodávat elektronům potřebnou energii pro uvolnění z vazeb v krystalické mřížce. Uvolněné elektrony jsou pak volně pohyblivé a na svém původním místě zanechají kladný náboj tzv. díru. Vnitřní elektrické pole fotovoltaického článku způsobuje, že jsou oba elektrické náboje přitahovány do různých směrů. Kladné nosiče náboje (díry) jsou přitahovány ke kontaktům zadní straně FV článku a záporné nosiče (elektrony) jsou naopak přitahovány ke kontaktům na přední straně. Tím vzniká elektrický potenciál, pro křemík 0,6 až 0,7 V. Některé nosiče nemají dostatečnou energii a nedostanou se ke kontaktům. Tyto nosiče rekombinují a tím se neúčastní na vzniku elektrického potenciálu. Pro některé fotony je struktura FV článku průhledná (transmise). Tyto fotony se nepodílejí na vzniku elektrického potenciálu [3].



Obrázek 2: Struktura FV článku [3]

1.3 Fotovoltaický článek



Obrázek 3: Druhy fotovoltaických článků [4]

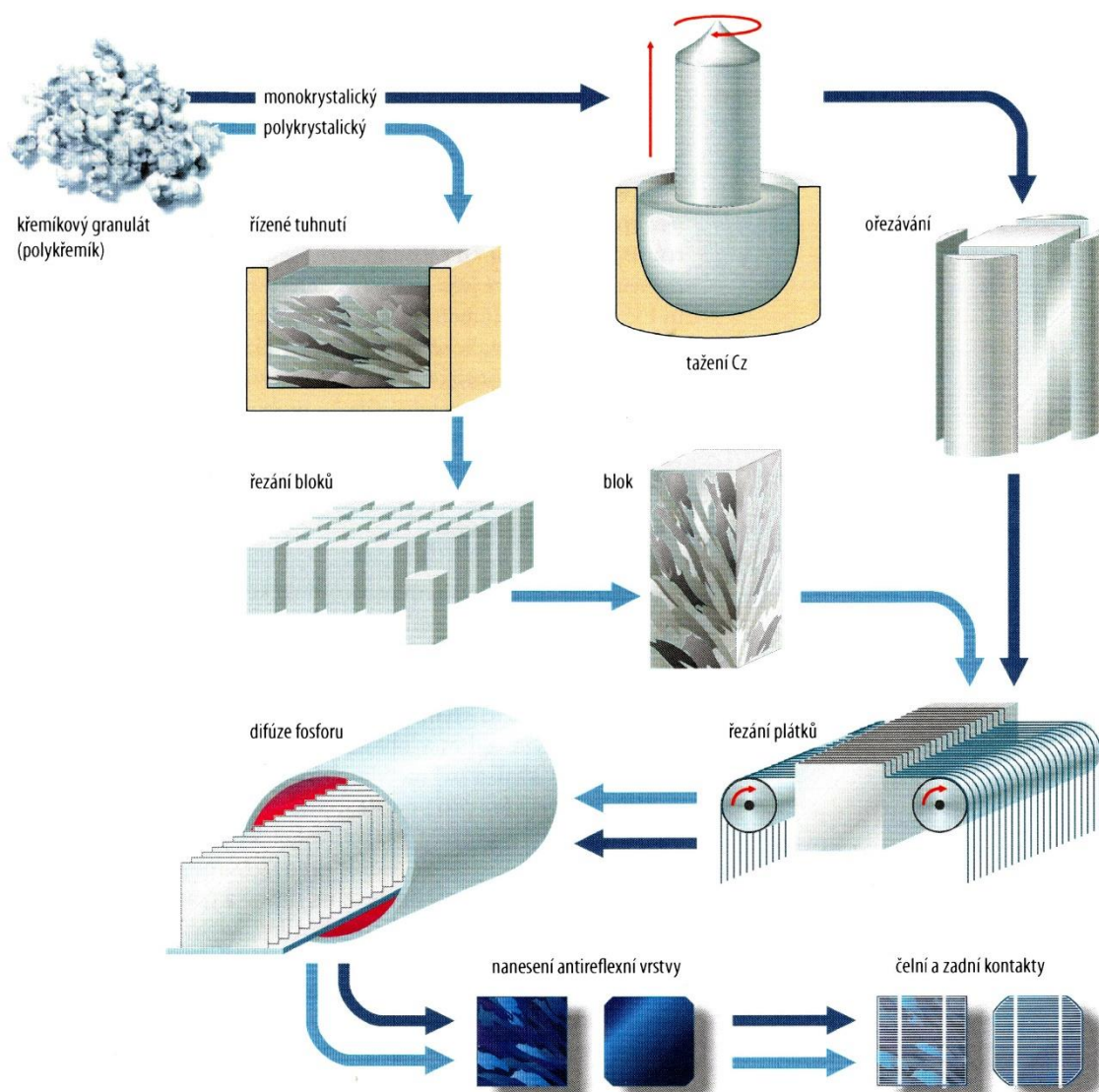
Technologie FV článků se dají rozdělit do tří skupin: Za prvé to jsou krystalické křemíkové články, které jsou jako plátky o tloušťce cca 200 μm navzájem spájeny do FV modulu (panelu), pak tenkovrstvé články, u nichž jsou několik μm silné vrstvy článku většinou zachyceny na čelním skle FV panelu a články s nanostrukturou, které jsou právě uváděny na trh, u nichž jsou vytvořeny kompletní FV články s nanometrovou velikostí a ty jsou pak propojeny do panelů. Dosud dominují krystalické křemíkové FV články s tržním podílem více než 90 %. Ve střednědobém horizontu lze očekávat silný nárůst podílu tenkovrstvých technologií. I nanostrukturované články mohou v dlouhodobém horizontu dosahovat relevantních tržních podílů [4].

1.3.1 Krystalický křemík

Nejdůležitějším materiálem pro krystalické FV články je křemík. Po kyslíku to je druhý nejčastější prvek na Zemi a je tedy dostupný téměř neomezeně. Není přítomen v čisté formě, nýbrž pouze jako chemická sloučenina s kyslíkem ve formě křemene. Nejdříve se musí odloučit nežádoucí kyslík z oxidu křemičitého. K tomu se křemenný písek zahřívá společně s uhelným prachem, koksem a dřevěným uhlím v obloukové peci na 1800 až 1900 $^{\circ}\text{C}$. Přitom vzniká oxid uhelnatý a tzv. metalurgický křemík s čistotou cca 98 %. Pro použití v elektronice je dvouprocentní nečistota stále příliš mnoho. Pro FV průmysl jsou přípustné pouze miliardy procent a pro polovodičový průmysl dokonce desetkrát méně [4].

Surový křemík se dále čistí chemickými procesy. Namele se na jemno a reaguje s plynným chlorovodíkem (kyselina solná) na vodík a trichlorsilan, kapalinou, která vaří při 31 $^{\circ}\text{C}$. V několika po sobě jdoucích stupních se destiluje tak dlouho, dokud podíl nečistot neklesne pod požadovanou hodnotu [4].

V dosavadním průmyslovém standardu se chemickým odloučením plynného skupenství z trichlorsilanu a vodíku tzv. Siemensovou metodou, získává nejčistší křemík. Oba plyny jsou přitom vháněny do reaktoru, ve kterém se nacházejí tenké tyče z velmi čistého křemíku o teplotě 1000 až 1200 °C. Z trichlorsilanu se na tyče vylučuje křemík. Takto vzniklý křemík je polykrystalický o čistotě až 99,999999999 %. Tyče narostlé na průměr 10 až 15 cm se nalámou na zlomky a složí jako výchozí materiál (křemíkový granulát) pro monokrystalické nebo polykrystalické křemíkové plátky s ještě vyšší čistotou, které se dále zpracovávají na FV články [4].



Obrázek 4: Výroba monokrystalických a polykrystalických FV článků [4]

1.3.2 Monokrystalické FV články

Pro výrobu monokrystalického křemíku se etablovala Czochralského metoda (tažení monokrystalu z kelímku). Při této metodě se polykrystalický výchozí materiál roztaví v křemenném kelímku při přibližně 1420 °C. Záradečný krystal s definovanou orientací krystalické mřížky se ponoří do křemíkové taveniny a za pomalého otáčení se vytáhne nahoru. Krystal přitom naroste na válcovitý monokrystal s průměrem až 30 cm a délkou několik metrů. Kulaté monokrystalové desky se ořezávají do potřebného průřezu a pak se drátovými pilami řezou na plátky (wafery) o tloušťce cca 0,2 mm. Odpad vzniklý při ořezávání monokrystalů se recykluje a používá se pro výrobu dalších monokrystalů. Nařezané plátky se chemicky za mokra očistí v leptacích a oplachovacích lázních [4].

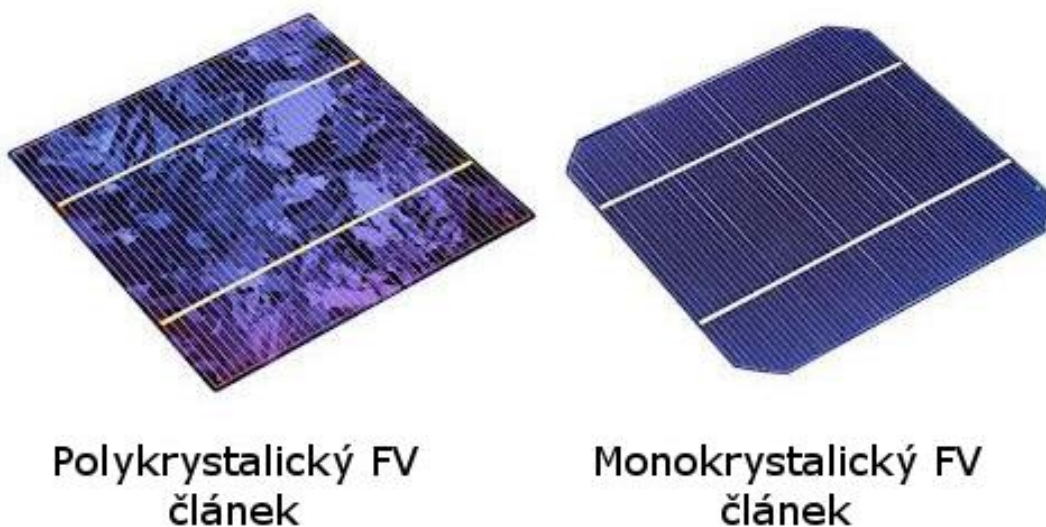
Surové plátky již dotované příměsí typu P (bor) se difúzí příměsí typu N (fosfor) vytvoří tenká vrstva. V difúzní peci se rozptýluje fosforový plyn při teplotách 800 až 900 °C a horní strana se předotuje. Vzniká srdce FV článku, přechod PN. Po nanesení antireflexní vrstvy se sítotiskem natisknou sběrné kontakty (přední pro odběr proudu a zadní kontakty). Nakonec se odleptají hrany FV článku, aby se oddělila PN vrstva a nedocházelo k bočním zkratům [4].

Monokrystalické články mají účinnost 15 až 19,3 % [4].

1.3.3 Polykrystalické FV články

Výchozí materiál se roztaví v křemenném kelímku, dotuje bórem a odlije do kvádrové formy. Kontrolovaným zahříváním a ochlazováním vychladne litý blok rovnoměrně v jednom směru. Při tomto řízeném tuhnutí se vytvoří mnoho velkých a homogenních křemíkových krystalů o velikosti zrna několika milimetrů až centimetrů. Meze zrna představují krystalové defekty se zvýšeným rizikem rekombinace a mají negativní vliv na účinnost FV článků, která je o něco nižší než u článků monokrystalických. Odlité bloky se dále řezou na plátky. Tyto plátky se oleptají, nanese se antireflexní vrstva a kontakty [4].

Polykrystalické články mají účinnost 13 až 17,1 % [4].



Obrázek 5: Porovnání polykrystalického a monokrystalického FV článku [5]

1.3.4 Amorfni FV články

Klasickým materiálem tenkovrstvé technologie je amorfni křemík. Malé amorfni moduly jsou v milionových množstvích používány v kapesních počítačích, hodinkách, kapesních svítilnách atd. Poté, co se výhrady týkající se jejich stability a procesu stárnutí ukázaly ve výsledcích dlouhodobých testů jako neopodstatněné, uplatňují se amorfni moduly ve stále větší míře i ve velkých FV zařízeních [3].

Amorfni křemík netvoří pravidelnou krystalickou strukturu, nýbrž neuspořádanou síť. Vyrábí se chemickým odlučováním při teplotách jen 200 °C z plynného silanu. Dotovaný amorfni křemík má velmi krátkou difuzní vzdálenost, volné nosiče náboje by ihned opět rekombinovaly, příspěvek k výrobě proudu je tedy sotva možný. Nápravu zajišťuje vestavba intristické (nedotované) vrstvy mezi vrstvy P a N, ve které je životnost nosičů náboje podstatně vyšší. Zde se odehrává absorpce světla a vytváření náboje, kdežto vrstvy P a N vytvářejí elektrické pole, které uvolněné nosiče náboje odděluje. Tato struktura se nazývá PIN. Velkou výhodou amorfni článků je, že jsou nanášeny na ohebné kovové fólie [3].

Nevýhodou amorfni článků je jejich malá účinnost, která v důsledku stárnutí článků vyvolaného světlem v prvních 6 až 12 měsících ještě klesá. Amorfni články mají ve stabilizovaném stavu účinnost 5 až 7 % [4].

1.4 Vývoj fotovoltaických článků

1.4.1 Články první generace

Fotovoltaické články jsou nejčastěji tvořeny z desek monokrystalického křemíku. Tento typ článků se prodává již od sedmdesátých let a tvoří převážnou většinu trhu. Pro výrobu je potřeba použít velmi čistého křemíku [5].

1.4.2 Články druhé generace

Zde dochází k výraznému snížení množství čistého křemíku. Zároveň se začínají využívat jiné prvky než křemík. Nejčastěji jde o nahrazování polykrystalickým a amorfni křemíkem s podstatně tenčí vrstvou (až 1000 krát menší). Snížení množství křemíku snižuje účinnost, na druhou stranu tato struktura přináší úsporu hmotnosti a zlepšení pružnosti. Tyto nové vlastnosti umožňují širší využití fotovoltaických článků [5].

1.4.3 Články třetí generace

Tato oblast je stále ve výzkumné fázi. Projevuje se snaha o maximální využití energie dopadajícího záření, nejčastěji ve formě několikanásobných přechodů tenkých vrstev. Je zde také snaha využít jiné metody oddělování nábojů např. fotoelektrochemické články nebo použití nanostruktur [5].

1.4.4 Články čtvrté generace

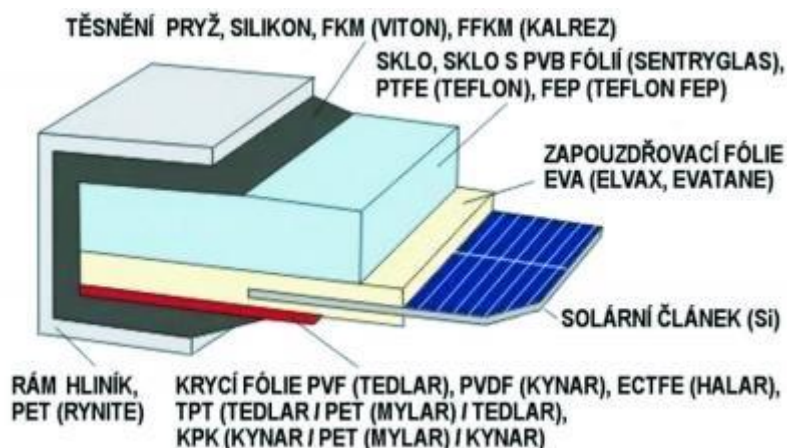
Posledním vývojovým stupněm rozumíme vícevrstvé profily plně využívající širokého slunečního spektra. Vrstvení profilů je založeno na principu naladění vrstev na různé

vlnové délky. Při dopadu záření o určité vlnové délce, je toto záření využito na vrstvě, která je aktivní pro danou vlnovou délku [5].

1.5 Fotovoltaický panel

Obvyklé krystalické FV články mají v současné době hodnoty výkonu až 4 W s typickým napětím na článku 0,5 V. Aby byly k dispozici větší jednotky s běžným napětím jako součástky připravené k připojení, sestavuje se mnoho solárních článků do solárního panelu. Solární panel se většinou skládá ze 72 fotovoltaických článků, které jsou zapojeny sériově za sebou (připojení kladného konce jednoho článku k zápornému konci článku sousedního) [3]. Základním parametrem FV panelu je výkon. Ten se udává v jednotkách Wp. Tato jednotka udává maximální výkon FV panelu při přímém osvětlení (přesné poledne, kdy je Slunce nejvýše na obloze) při ideálních podmínkách (25 °C).

Kvůli ochraně fotovoltaických článků je nutné provést konstrukci rámovaného panelu. Články jsou upevněny v kompozitním materiálu EVA (ethylen vinyl acetát) a chráněny ze zadní strany polymerním materiálem (fólie) a ze přední strany sklem kvůli průchodu světla. Celá tato konstrukce je upevněna v hliníkovém rámu s těsněním [3].



Obrázek 6: Konstrukce fotovoltaického panelu [6]

Otvorem ve fólii zadní strany jsou vyvedeny ven vývody větví článků. Na místě průchodu se přilepí připojovací krabice modulu. Propojovací krabice je vyrobena z tepelně stabilního plastu a obsahuje obtokové diody a připojovací svorky, pomocí nichž lze vzájemně připojit více panelů mezi sebou. Připojovací krabice musí odolávat povětrnostním podmínkám a musí mít stupeň ochrany krytem nejméně IP 54 [3].

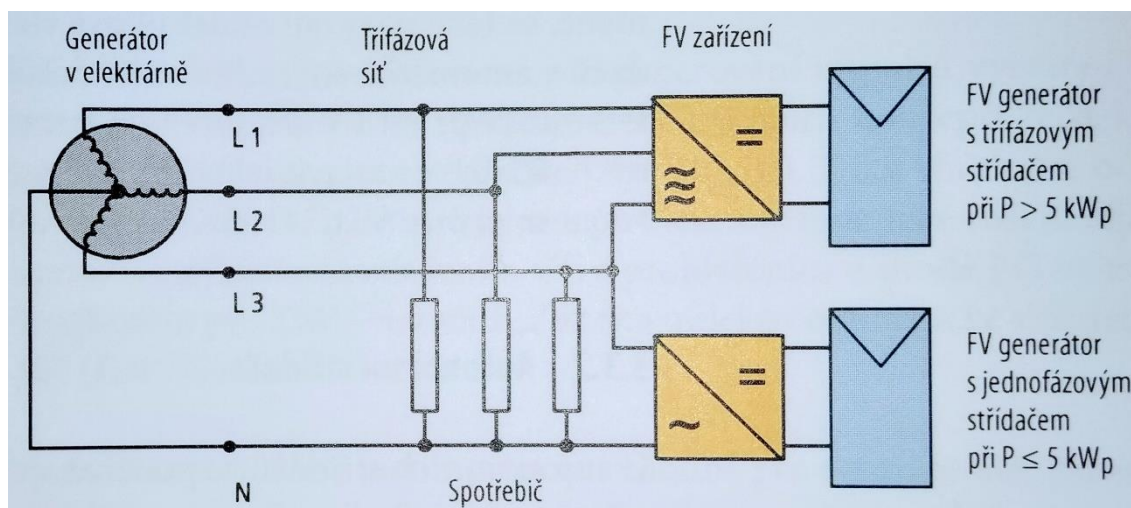
1.6 Střídač

Střídač umožňuje propojení mezi solárním generátorem a sítí střídavého proudu, případně spotřebičem na střídavý proud. Převádí DC (stejnoseměrný) proud vyrobený solárními panely na AC (střídavý) proud a přizpůsobuje frekvenci a velikosti napětí dodávaného do distribuční sítě. Pomocí moderní výkonové techniky probíhá převod na střídavý proud jen s malými ztrátami [3].

Aby střídač dodával do sítě maximální výkon, musí pracovat v bodě maximálního výkonu (MPP) solárního generátoru. V důsledku měnícího se ozáření a teploty se výkon solárního generátoru mění. Regulátor MPP ve střídači vyrovnává pracovní bod přizpůsobením napětí solárního generátoru. Moderní střídače navíc umožňují monitoring a následné vyhodnocení pomocí připojeného PC [3].

Podle aplikace se rozlišují střídače, které se používají v systémech napojených na síť (síťové střídače), nebo v ostrovních systémech (ostrovní střídače). V ostrovních systémech umožňují střídače provoz konvenčních spotřebičů střídavého proudu. U systému připojených k síti je střídač přímo nebo přes domovní rozvod napojen na veřejnou rozvodnou síť. Při navázání přes domácí rozvod se vyrobený solární proud spotřebuje nejdříve v domě, přebytek se v daném případě odevzdává do veřejné sítě [4].

U systémů s výkonem do 5 kW_p jsou používány jednofázové střídače, u větších zařízení jsou používány trojfázové rozvody. U trojfázových rozvodů je možné zapojení jednoho třífázového střídače, na kterém dochází k symetrickému rozdělení výkonu do tří fází nebo zapojení tří jednofázových střídačů, které se stejnoměrně rozdělí na tři fáze prostřednictvím komunikativní vazby [4].



Obrázek 7: Princip FV systému s jedno- nebo třífázovým střídačem [4]

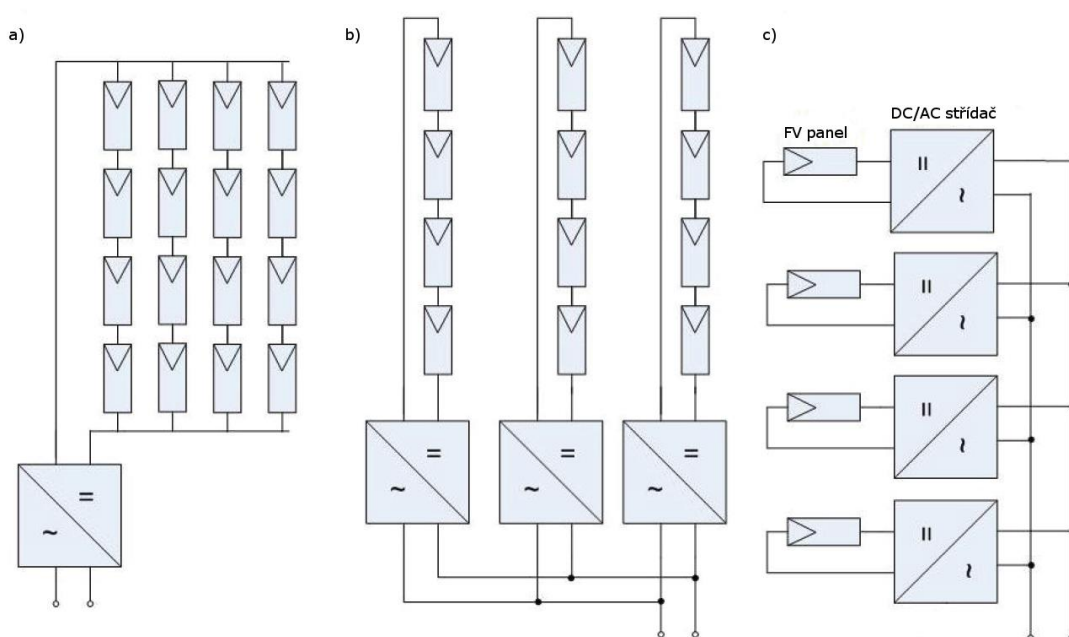
1.6.1 Koncepce střídačů

Podle principu funkce se střídače dělí na střídače řízené sítí a samostatně řízené střídače. Střídače řízené sítí synchronizují svůj kmitočet, fázi a napětí s aktuálními parametry rozvodné sítě. Samostatně řízené střídače (ostrovní) generují svůj vlastní kmitočet, který odpovídá kmitočtu rozvodné sítě (50 Hz) aby bylo možno použít běžné elektrické spotřebiče střídavého proudu [5].

Z hlediska zapojení ve FV systému se střídače dělí na:

- Centrální střídač (všechny panely připojeny do jednoho střídače)
- Řetězové nebo stringové střídače (jednotlivé střídače jsou připojeny k řadě FV panelů)
- Master-Slave-Koncepce (při stoupajícím osvětlení kdy je dosaženo hranice výkonnosti Master střídače jsou připojovány Slave střídače)
- Modulové střídače (každý FV panel má svůj vlastní střídač)

Na obrázku 8 jsou zobrazeny schémata jednotlivých způsobů zapojení střídačů. Centrální střídače (a) jsou využívány ve velkých FV elektrárnách. Řetězová zapojení (b) jsou využívána ve středně velkých elektrárnách a malé elektrárny využívají modulové střídače (c) [5].

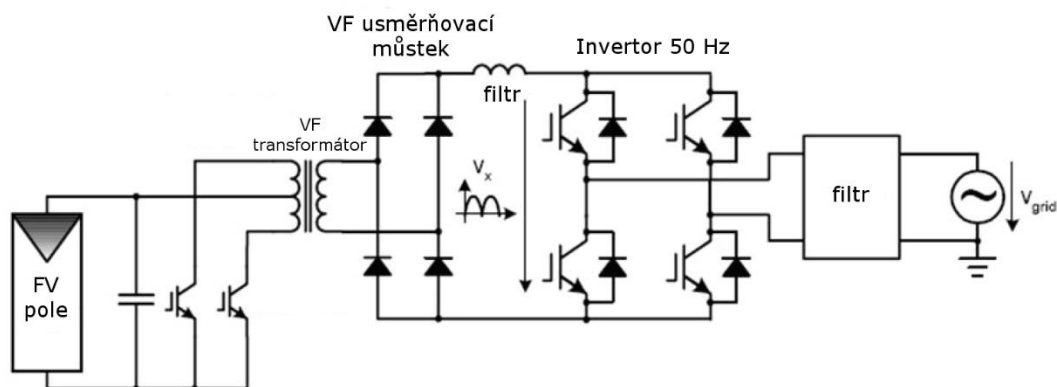


Obrázek 8: Koncepce zapojení střídačů [5]

1.6.2 Konstrukce střídačů

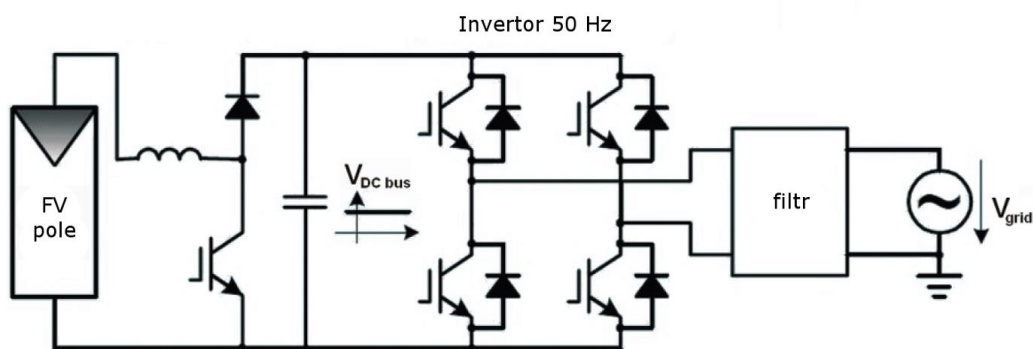
Střídače lze také rozdělit podle principu vnitřního zapojení na střídače s transformátorem a střídače bez transformátoru. Běžné střídače jsou vyráběny s vnitřním transformátorem, který synchronizuje DC napětí s AC výstupem. Střídače netransformátorové používají mikrokontroler a elektrické komponenty pro přeměnu DC na AC [7].

Střídače s transformátorem se dále dělí na střídače s nízkofrekvenčním (NF) transformátorem a na střídače s vysokofrekvenčním (VF) transformátorem. Střídače s NF transformátorem mají značné ztráty výkonu. Mimo to transformátor zvyšuje konstrukční velikost, emise hluku, hmotnost a také náklady na zařízení. Střídače s VF transformátorem jsou menší, lehčí a účinnější. Na druhou stranu tyto střídače vyžadují nákladnou výkonovou elektroniku. Výhodou střídačů s transformátorem je galvanické oddělení DC a AC obvodů [3].



Obrázek 9: Vnitřní zapojení střídače s VF transformátorem [5]

Střídače netransformátorové jsou lehké, kompaktní a relativně levné. Díky tomu, že tyto střídače používají spínače elektrické, a ne spínače mechanické, klesá množství tepelných ztrát. Nevýhodou tohoto zapojení je přímé propojení DC a AC obvodů. To zvyšuje riziko zkratů a poruch a je nutná dodatečná ochrana osob proudovým chráničem. Výhodou tohoto zapojení je téměř 100 % účinnost [7].



Obrázek 10: Vnitřní zapojení střídače bez transformátoru [5]

1.7 Baterie a akumulace

Výroba elektrické energie ze solární energie je značně omezena povětrnostními vlivy. Z tohoto důvodu nelze přesně předpovídat množství vyrobené energie. Vlivem zvýšené oblačnosti může docházet k fluktuacím a nestabilitě proudu z FV systému. FV systém s akumulací energie tyto vlivy může eliminovat a lépe kontrolovat flexibilitu výkonu [8]. Solární baterie ukládá nevyužitou energii z fotovoltaické elektrárny a umožňuje její využití při poklesu, či nedostatku energie z fotovoltaického systému.

Baterii tvoří elektrochemický článek. Funkční částí článku jsou elektrody, kladná a záporná. Tyto elektrody vytváří energetický potenciál, díky kterému můžeme článek využívat jako zdroj energie. Obě elektrody jsou umístěny v elektrolytu, který umožňuje transport nosičů náboje z jedné elektrody na druhou [9].

Základními parametry solárních akumulátorů jsou kapacita, výkon, hloubka vybití a nabíjecí/vybíjecí cykly. Kapacita je celkové množství elektrické energie, která může být

uložena v akumulátoru a udává se v jednotkách Wh. Výkon baterie je množství elektrické energie ve wattech, kterou akumulátor dokáže dodat najednou. Hodnota hloubky vybití udává procentuální množství energie, kterou lze z akumulátoru využít. Z důvodu elektrochemické struktury akumulátoru není vhodné je zcela vybit. Pro delší životnost baterie je nutné udržovat míru nabití minimálně 60 %. Počet cyklů je parametr baterie, který udává počet nabití a vybití akumulátoru. Jako jeden cyklus se bere plné nabití následované plným vybitím akumulátoru. Častým nabíjením a vybíjením dochází k pomalé degradaci akumulátoru a tím také klesá jeho kapacita. Výrobci akumulátorů většinou udávají parametr počet cyklů v podobě hodnoty poklesu celkové kapacity v závislosti na počtu cyklů [10].

Nejvyužívanější technologie akumulátorů pro fotovoltaické systémy jsou:

- Olověné akumulátory
- Lithium-iontové akumulátory

1.7.1 Olověné akumulátory

Olověné akumulátory se skládají z několika dílčích článků o jmenovitém napětí 2 V na článek. V rámci blokové konstrukce jsou uloženy ve společném pouzdru a uvnitř sériově propojeny do bloku (např. 6 článků na jeden blok 12 V). U velkých akumulátorových systémů jsou akumulátory kvůli velké hmotnosti většinou provedeny jako jednotlivé články, které se při montáži musí navzájem propojit. V takovém případě je možno sériovým nebo paralelním zapojením vytvořit různá napětí a kapacity systému [4].

Akumulátorový článek představuje nádobka naplněná kapalným elektrolytem, který tvoří zředěná kyselina sírová (H_2SO_4), do něhož jsou ponořeny dvě sady desek opačné polarity. Tyto desky slouží jako elektrody a skládají se z nosiče olova ve tvaru mřížky a aktivního materiálu. Porézní aktivní materiál představuje vlastní zásobník energie a díky své houbovitě struktuře poskytuje dostatečnou plochu pro elektrochemickou reakci. V nabitém stavu tvoří aktivní hmotu záporné elektrody olovo a kladné oxid olovnatý (PbO_2). K izolaci mezi elektrodami slouží tzv. separátory [4].

Při odběru proudu protékají spotřebičem elektrony ze záporného pólu ke kladnému a způsobují chemickou reakci mezi deskami a kyselinou sírovou. Na povrchu obou sad desek vzniká přitom síran olovnatý (PbSO_4), neboť na aktivní materiál se váže síra z kyseliny. Elektrolyt se při vybíjení spotřebuje. Tím klesá koncentrace kyseliny, ředí se. Podle hustoty kyseliny lze kontrolovat stav nabití akumulátoru [4].

Při opakovaném nabíjení akumulátoru z FV generátoru napětím, které je vyšší než aktuální napětí akumulátoru, dochází k pohybu elektronů opačným směrem než při vybíjení. Tím nastane vratná chemická změna. Tento proces není kompletně reversibilní. Malé množství síranu olovnatého se už zpátky nerozpustí (sulfatace). Akumulátor utrpí při každém cyklu nabíjení/vybíjení malý úbytek kapacity, který je tím větší, čím bylo vybití hlubší [4].

1.7.2 Lithium-iontové akumulátory

Vůči olověným akumulátorům mají lithiové iontové akumulátory některé přednosti. Mají značně vyšší počet cyklů, větší energetickou kapacitu při zároveň větší hloubce vybití. Aktuální vývoj a nové nabídky vzbuzují dojem, že tyto akumulátory představují všeobecně aplikovatelné zdroje bez potřeby údržby a s životností 20 let. Bohužel údaje výrobce zde vycházejí pouze ze zrychlených testů stárnutí bez jasně určených parametrů [4].

Konstrukce lithiových iontových akumulátorů je podobná olověným akumulátorům. Kladný pól (anoda) se skládá z oxidu lithia a záporný pól (katoda) z grafitu. Elektrolyt mezi fóliemi obou pólů tvoří soli lithia s obsahem fluoru a organická rozpouštědla. Membrána s propustností pro ionty (separátor) mezi pólovými fóliemi chrání baterii před vnitřními zkraty. Parametry jako provozní bezpečnost, měrný výkon apod. lze ovlivnit různými separátory a jinou akumulátorovou chemií. Podle toho představuje lithium-iontový akumulátor pouze všeobecné označení pro akumulátory založené na lithiu [4].

Pokud se akumulátor vybíjí, odevzdají lithiové atomy přítomné na anodě každý po jednom elektronu, který teče vnějším proudovým obvodem přes spotřebič ke katodě. Paralelně tečou přes separátor volné lithiové ionty také od anody ke katodě. Lithium přitom zůstává na straně katody jako iont. Elektrony lithia si převezmou silně ionizované ionty přechodných kovů. Pokud se akumulátor nabíjí probíhá opačný proces [4].



Obrázek 11: Lithiový a olověný akumulátor [11] [12]

1.8 Nabíjecí regulátor

Hlavní úloha nabíjecího regulátoru spočívá v ochraně akumulátoru před přebíjením a hlubokým vybitím. Oba tyto provozní stavy mohou značně zkrátit životnost akumulátoru. V případě trvalého přebíjení vzniká u akumulátorů s kapalným elektrolytem dodatečně vysoce výbušný plyn. Náklady na akumulátory ve FV systémech jsou velmi vysoké. Pouze svědomitou údržbou a optimálním vedením provozu lze zvýšit životnost a hospodárnost FV systému. Proto je třeba na nabíjecí regulátor klást následující základní požadavky [4]:

- ochrana před přebíjením
- ochrana před hlubokým vybitím
- zamezení nežádoucího vybíjení
- optimální nabíjení akumulátorů

- indikace stavu nabití
- ochrana proti zkratu
- ochrana proti přepólování

Ochrana před přebíjením akumulátoru je zaručena tak, že nabíjecí regulátor jako aktivní člen přeruší tok energie z FV generátoru. Pro tento účel se používají výkonové elektronické spínače typu MOSFET a IGBT [4].

Aby byla zajištěna ochrana před hlubokým vybitím akumulátoru, odpojí aktivní člen spotřebič od akumulátoru, což se označuje jako odhození zátěže. Po dosažení definovaného minimálního nabití se spotřebič opět připojí. Podle složitosti systému se buď připojí všechny spotřebiče současně, nebo se připojují postupně podle dané priority [4].

Neozářený FV generátor se chová jako spotřebič. Toto nežádoucí vybíjení se eliminuje sériovou diodou zapojenou v závěrném směru s pokud možno nízkým napětím v propustném směru v nabíjecím regulátoru. Aby se snížily ztráty vlivem této závěrné diody, může se použít anti-sériově zapojený MOSFET [4].

Optimální nabíjení akumulátoru se realizuje rozdílně podle technologie nabíjení. Klasické nabíjení s určeným konstantním proudem a průběhem napětí ve veřejné síti je použitelné jen podmíněně, protože proud a napětí ve FV zařízení závisí na aktuálním ozáření a zatížení spotřebiči [4].

Indikace stavu nabíjení poskytuje důležité informace, podle kterých může uživatel posoudit výkonnost bateriového systému a přizpůsobit ji svým potřebám [4].

Ochrana proti zkratu a přepólování patří k nezbytným bezpečnostním opatřením elektronické části. To je zvláště proto, že nabíjecí regulátor hraje ústřední funkci v souhře několika komponent, takže nebezpečí škodlivé interakce se musí předem vyloučit [4].

1.9 Fotovoltaický systém

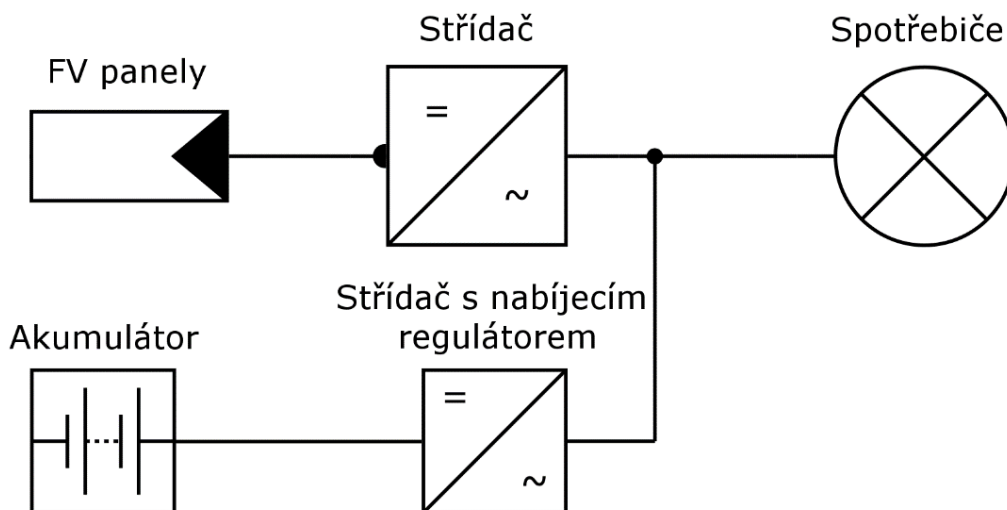
FV systém spojuje všechny komponenty potřebné ke generování elektrické energie ze slunečního záření. FV systémy lze rozdělit na ostrovní systémy (off-grid) a systémy připojené k rozvodné síti (on-grid) [4]. Tyto dva základní typy zapojení se dále dělí na různé koncepce podle aplikace, např. hybridní systémy s akumulací (kombinace off-grid a on-grid), systémy s mikroměniči atd. [13].

1.9.1 Ostrovní systém

Tento typ FV systému je ideální pro místa, kde není k dispozici elektřina z distribuční sítě. Součástí ostrovních systémů bývá často i záložní generátor na fosilní paliva, či jiný druh generátoru (větrná turbína) [13].

FV panely jsou připojeny do série tzv. stringů. Tyto stringy jsou přes rozvaděč generátoru spojeny a přivedeny do regulátoru napětí ve střídači. Regulátor napětí ve střídači reguluje stejnosměrné napětí, obvykle 12 nebo 24 V, do baterie. Střídač napětí mění stejnosměrné (DC) napětí z baterie a panelů na střídavé (AC) napětí, obvykle 230 V/~50 Hz, které je běžně využíváno v domácnostech. AC napětí je dále vedeno do

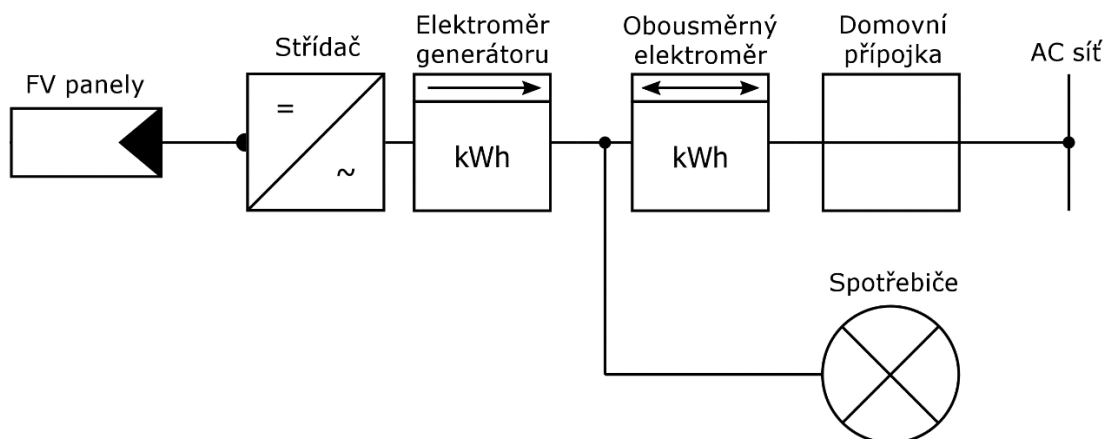
elektroodvodny, kde je rozděleno a využíváno různými spotřebiči. Přímo nevyužitá energie se ukládá do akumulátorů. Není-li k dispozici elektrická energie z fotovoltaických panelů, lze využít energii uloženou v akumulátorech [13].



Obrázek 12: Koncepte ostrovního systému

1.9.2 Systém připojený k distribuční síti

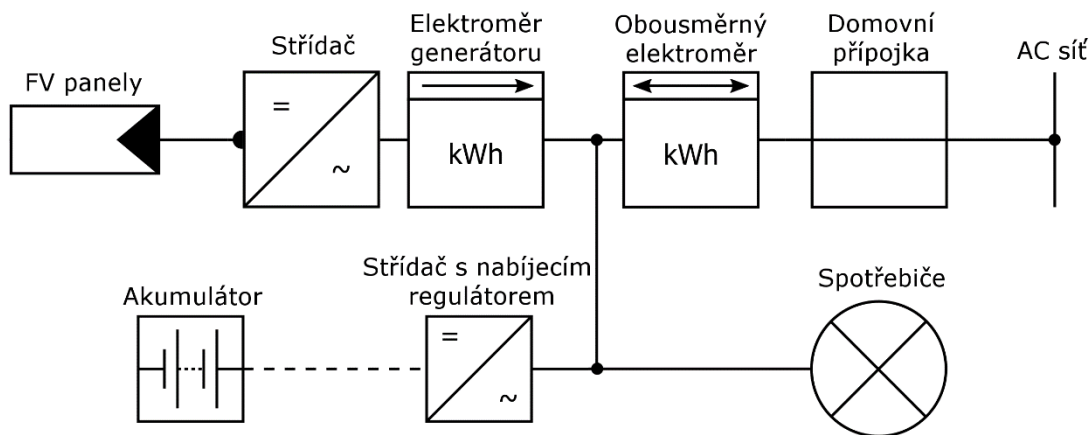
Systémy připojené k distribuční síti jsou cenově efektivní. Systém má podobné složení jako výše popsáný ostrovní systém. Jediným velkým rozdílem je absence baterie a záložního systému. Velkou výhodou on-grid systému je jeho připojení do distribuční sítě. Generované stejnosměrné napětí je pomocí střídače přeměněno na střídavé napětí, které je využito elektrickým zařízením v domácnosti. V případě, že se generovaná energie nevyužívá přímo v domácnosti je přes elektroměr přivedena do distribuční sítě [13].



Obrázek 13: Systém připojený k distribuční síti

1.9.3 Hybridní systém s akumulací

Hybridní systémy jsou kombinací dvou výše popsaných systémů (off-grid a on-grid). Spojením vlastností obou typů systémů získáme systém, který ukládá potřebnou energii do baterie a přebytky posílá do distribuční sítě. Velkou výhodou je také soběstačnost systému při výpadku distribuční sítě [13].



Obrázek 14: Hybridní FV systém s akumulací

1.9.4 Systém s mikroměniči

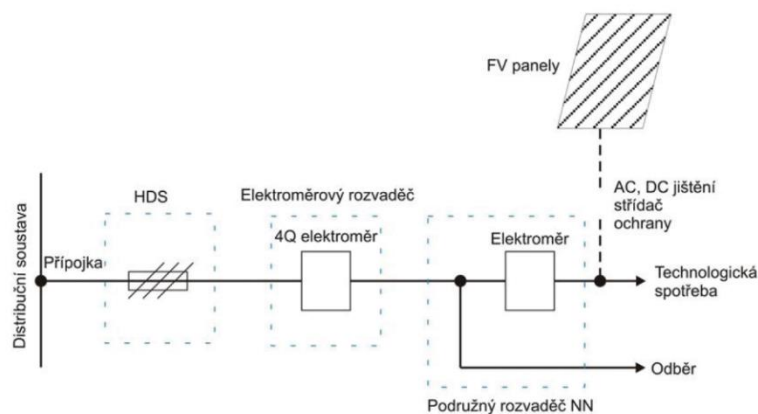
Fotovoltaický systém s mikroměniči je nová perspektivní metoda výroby elektrické energie ze Slunce. Schéma zapojení jednotlivých komponentů je podobné jako u systému on-grid obrázek 13. V tomto systému není připojen pouze jeden centrální střídač, ale ke každému panelu je připojen jeden mikroměnič. Tyto mikroměniče jsou umístěné na zadní straně každého panelu. Mikroměniče jsou připojeny paralelně a jejich výstupy jsou spojeny v rozvaděči generátoru a přivedeny do centrálního střídače [13].

Tato metoda umožňuje individuální monitoring každého panelu a snižuje výskyt vysokého DC napětí v systému. Výhodou tohoto systému je, že při zastínění jednoho panelu není nijak ovlivněn výkon ostatních panelů [13].

1.10 Připojení fotovoltaického systému do sítě

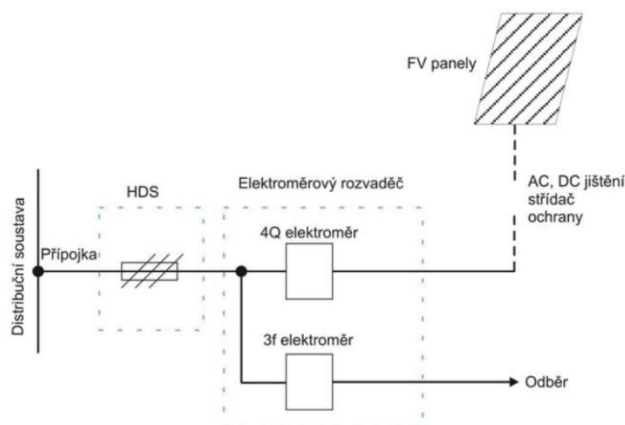
Připojení FV systémů do distribuční sítě může být provedeno ve dvou základních variantách.

První varianta obrázek 15 představuje systém zapojení v tzv. zeleném bonusu. Za hlavní domovní skříní (HDS) je osazen čtyřkvadrantový elektroměr (4Q) a za ním je napojený domovní rozvod a fotovoltaická elektrárna pomocí dalšího elektroměru. Toto zapojení se využívá v případech, kdy je převážná část vyrobené elektrické energie využita pro vlastní spotřebu objektu s instalovaným fotovoltaickým systémem [5].



Obrázek 15: Zapojení systému v zeleném bonusu [5]

Druhá možnost obrázek 16 představuje systém zapojení v tzv. výkupním tarifu. Fotovoltaická elektrárna je v tomto případě připojena mezi stávající elektroměr a hlavní domovní skříň (HDS) pomocí čtyřkvadrantového elektroměru. Tento systém zapojení se využívá v případech, kdy je veškerá vyrobená elektrická energie dodána do distribuční sítě [5].



Obrázek 16: Zapojení systému ve výkupním tarifu [5]

1.10.1 Zjednodušené připojení

Od 1. 2. 2016 platí nová vyhláška Energetického regulačního úřadu (dále jen ERÚ) č. 16/2016 Sb., o podmínkách připojení k elektrizační soustavě. Vyhláška definuje novou kategorii výroben, a to tzv. mikrozdroje. Jedná se o instalaci s maximálním výkonem do 10 kW včetně, se jmenovitým střídavým fázovým proudem do 16 A na fázi a připojenou k distribuční soustavě. Pokud chce zájemce využít zjednodušeného připojení, musí dodržet technické parametry mikrozdroje [4].

1.10.2 Mikrozdroj

Provozovatel výroby s výkonem do 10 kWp bez potřeby licence a zjednodušeným připojením k distribuční soustavě. Provozovatel musí zainvestovat do zařízení, které

zabrání přetokům vyrobené elektřiny do sítě a mít na zřeteli, že pokud by k nějaké dodávce do distribuční sítě došlo, bude mu uložena pokuta podle platného cenového rozhodnutí ERÚ. Provozovatel musí být fyzická nepodnikající osoba [4].

1.10.3 Zdroj bez licence s přetoky

Opět se jedná o výrobu s výkonem do 10 kWp bez potřeby licence. Provozovatel má po uvedení do provozu volnější ruce. Není nucen technickým opatřením zabráňovat nulovým přetokům do distribuční soustavy. Za případné přetoky může inkasovat tržní cenu, kterou si domluví s obchodníkem, nebo provádět tzv. fakturační nettování silové elektřiny (Net metering). Provozovatel potřebuje smlouvu o připojení s provozovatelem distribuční soustavy a dohodu o převzetí odpovědnosti za odchylku vytvářenou neplánovanými dodávkami přetoků do soustavy a zaváže se k úhradě ceny za dodanou přebytkovou elektřinu. Provozovatel musí být fyzická nepodnikající osoba [4].

1.10.4 Výroba elektřiny pro podnikání

Jedná se o výrobu elektřiny pro snížení nákladů na nákup elektrické energie. Výkon připojené výroby nerozhoduje. Provozovatel výroby musí být držitelem licence, protože výrobu a prodej elektřiny v takovém typu výroby, z důvodu využití vyrobené elektřiny k podnikání, je nutné označit jako energetické podnikání. Musí splnit plný proces žádosti o připojení. K uvedení výroby do provozu potřebuje smlouvu s provozovatelem distribuční soustavy o připojení a smlouvu s obchodníkem o dodávkách vyrobené elektřiny. Provozovatel je podnikající fyzická nebo právnická osoba [4].

1.10.5 Ostrovní systém

Jedná se o výrobu elektřiny pro eliminaci vlastní spotřeby. Elektřina je zcela spotřebována majitelem systému a výroba není připojená k distribuční soustavě. Nejedná se tudíž o podnikání podle energetického zákona a licence je zbytečná bez ohledu na výkon. K uvedení do provozu není nutná jakákoliv smlouva či povolení kýmkoliv dalším. Provozovatelem může být kdokoliv [4].

1.11 Legislativa ČR

1.11.1 Energetický zákon

Zákon č. 458/2000 Sb., energetický zákon, je právním základem pro podnikání v energetice. Až do počátku roku 2015, byly zprovozněné energetické zdroje připojené do elektrizační soustavy posuzovány za provádění podnikatelské činnosti. S ukončením provozní podpory většiny decentrálních zdrojů k 31. 12. 2013 nové zdroje připojené po tomto čase nesplňovaly jednu ze základních podmínek podnikání – peněžní příjem, ale byly dále posuzovány za výdělečné zdroje. Podléhaly nutnosti vlastnit licenci pro připojení zdroje, a přesto že jejich majitel neměl z výroby elektřiny zisk, byl za svoje svobodné rozhodnutí státem sankciován. Tento paradox se snaží vyřešit Česká fotovoltaická asociace [4].

1.11.2 Zákon o podporovaných zdrojích energie

Zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie uvádí, že se podpora elektřiny z obnovitelných zdrojů vztahuje pouze na elektřinu vyrobenou využitím energie slunečního záření ve výrobně elektřiny s instalovaným výkonem do 30 kWp, která je umístěna na střešní konstrukci nebo na obvodové zdi jedné budovy spojené se zemí pevným základem evidované v katastru nemovitostí. Podporovaná je pouze elektřina vyrobená v jedné výrobně elektřiny do 30 kWp, která je umístěna na jedné střešní konstrukci nebo na obvodové zdi jedné budovy spojené se zemí pevným základem evidované v katastru nemovitostí [14].

1.11.3 Stavební zákon

Podle stavebního zákona slouží FV systém k zásobování stavby elektrickou energií a patří mezi technická zařízení stavby. Je její nedílnou součástí a spolu s dalším technickým zařízením zabezpečuje způsob využití stavby, pro který byla navržena a provedena a ke kterému bylo následně povoleno i její využívání [4].

Pokud je FV systému instalován na stavbu nebo do stavby, jedná se vždy o změnu dokončené stavby. Podle § 76 odst. 6 stavebního zákona nevyžadují stavební úpravy rozhodnutí o umístění stavby ani územní souhlas [4].

Podle § 103 odst. 1 písm. d) stavebního zákona stavební povolení ani ohlášení stavebnímu úřadu nevyžadují stavební úpravy, pokud [15]:

- úpravy nezasahují do nosné konstrukce stavby
- nemění vzhled ani způsob užívání stavby
- nevyžadují posouzení vlivů na životní prostředí
- jejich provedení nemůže negativně ovlivnit požární bezpečnost stavby
- nejde o stavbu, která je kulturní památkou

1.12 Elektrotechnické normy VDE a DIN

Zřízení fotovoltaického zařízení a jejich instalace se provádí dle stávajících ustanovení VDE, zejména dle norem VDE 0100 „Zřizování silnoproudých zařízení se jmenovitým napětím do 1000 voltů“ (všechny příslušné části), VDE 0126-23 (EN 62446) „Do sítě připojené FV systémy - minimální požadavky na systémovou dokumentaci, kontrola uvedení do provozu a opakované zkoušky“, VDE 0105 část 100 „Provoz elektrických zařízení“ a VDE 0298 „Používání kabelů a izolovaných vedení pro silnoproudá zařízení“. Zvláštní požadavky na instalaci FV zařízení formuluje VDE 0100 část 712 „Fotovoltaické napájecí systémy“ (IEC 60364-7-712). Pro přepětiovou ochranu a ochranu proti bleskům se musí dodržovat norma VDE 0185-30 část 1 až 4 [4].

1.13 Bezpečnost

1.13.1 Ochrana před chybovými proudy

Hlavní vypínač stejnosměrného proudu

Norma VDE 0100-712 „Zřizování nízkonapětových zařízení – část 7-712: Požadavky na provozní stanoviště, prostory a zařízení zvláštního druhu – Solární fotovoltaický napájecí systémy“ (IEC 60364-7-712) požaduje mezi fotovoltaickým generátorem a střídačem hlavní vypínač stejnosměrného proudu, aby bylo možné v případě poruchy nebo při údržbě a opravách komponenty vzájemně oddělit [3].

Ochranný spínač vedení střídavého proudu

Jedná se o nadproudové ochranné zařízení, které lze po rozpojení opět zapnout. Odděluje fotovoltaické zařízení automaticky od elektrické sítě, pokud dojde k přetížení nebo zkratu. Často se k tomuto účelu používají samočinné pojistky. Při zapojování je třeba dbát na správné pólování a směr toku energie [3].

Proudový chránič

Proudový chránič (ochranný spínač chybového proudu) sleduje protékající proud v přívodní a zpětné větvi elektrického obvodu. Proudový chránič zareaguje při chybě izolace nebo zkratu jednoho vodiče na zem nebo na kostru [3].

1.13.2 Požární bezpečnost

Z hlediska požární ochrany jsou fotovoltaické systémy a aplikace problematické zejména z důvodů ztížené dostupnosti pro jednotky požární ochrany (systémy na střeších objektů) a ztížených podmínek pro zásah (stejnosměrnou část fotovoltaických systémů nelze vypnout, jde o zásah pod napětím a v ochranném pásmu). Měníč napětí s odpojovačem se v instalaci fotovoltaické elektrárny umísťuje tak, aby stejnosměrná část rozvodu, která zůstává pod stálým napětím, byla co nejkratší. Střešní nebo fasádní instalace fotovoltaických panelů nesmí svým provedením znemožňovat odvětrávání objektu či prostoru, omezit provoz, opravy a údržbu spalinových cest, ani bránit přístupu jednotek požární ochrany při zásahu [16].

Vzhledem k tomu, že většina standardně vyráběných fotovoltaických panelů obsahuje pouze minimální množství hořlavých hmot, lze je jako zdroj vzniku požáru téměř spolehlivě vyloučit. Jedinými hořlavými součástmi fotovoltaických systémů jsou přípojovací boxy, propojovací konektory a propojovací kabely (izolace), na jejichž uhašení v prvopočátku většinou postačí přenosný hasicí přístroj určený k hašení zařízení pod napětím (např. práškový nebo CO₂), který musí být umístěn v každém podnikovém zařízení. Jednotky požární ochrany mají tyto věcné prostředky rovněž ve standardní výbavě [16].

1.13.3 Recyklace

Vzhledem k drasticky stoupajícím množství instalovaných FV systémů na celém světě je otázka recyklace modulů stále důležitější. Toto téma má význam také pro výpočet doby energetické amortizace FV systémů, protože při použití recyklovaných materiálů energetické náklady na výrobu modulů klesají [4].

Kromě křemíkových článků, příp. základního materiálu lze recyklovat jejich součásti – stříbro, sklo, hliník a jiné materiály. To platí rovněž pro tenkovrstvé panely, přičemž zde je proces separace komplexnější. Jelikož ceny takovýchto materiálů stále stoupají, je recyklace stále ekonomicky zajímavější. Látky jako je tedlar, EVA a jiná plniva jsou v principu nerecyklovatelné [4].

1.14 Dotace

Pomocí dotace může provozovatel FV zařízení získat finanční prostředky pro realizaci nebo provozování tohoto systému. Důležité rozdělení dotací je podle modelu poskytování dotace [4]:

- Provozní dotace
- Investiční dotace

1.14.1 Provozní dotace

V současné době nové provozní dotace pro FV systémy neexistují. Poslední provozní dotace přímého výkupu a zelených bonusů byla vyplácena naposledy v roce 2013 [4].

1.14.2 Investiční dotace

Česká republika se tak jako ostatní členské státy Evropské unie zavázala do roku 2020, v rámci plnění cílů v oblasti energetické účinnosti, ke snížení emisí skleníkových plynů, zvýšení podílu obnovitelných zdrojů energie a zvýšení energetické účinnosti [4].

Finanční podpora k plnění cílů určených Evropskou unií je administrována Státním fondem životního prostředí České republiky. Tento fond v tuto chvíli organizuje dva velké dotační programy, které jsou určené ke snižování energetické náročnosti a instalaci obnovitelných zdrojů: Operační program Životního prostředí a program Nová zelená úsporám [4].

Dotační programy jsou určeny jak pro rodinné či bytové domy tak i pro budovy používané v podnikání. Pro rodinné domy v této chvíli běží investiční podpora, konkrétně 3. výzva k podávání žádostí pro rodinné domy ze dne 22. října 2015. Tato podpora bude dodávat finanční prostředky až do roku 2021 nebo do vyčerpání dostupných finančních prostředků, které jsou odhadovány na 20 mld. Kč. V oblasti podnikání zaštiťuje finanční podporu operační program Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost (OPPIK). Tento program se dále rozděluje na program Úspory energie, který umožňuje získání prostředků pro snížení energetické náročnosti výroby a snížení výdajů za elektrickou energii. Program Úspory energie rozdělí do roku 2020 téměř 20,5 mld. Kč. Dalším programem v OPPIK je program Nízkouhlíkové technologie. Cílem tohoto programu je vyšší míra uplatnění nízkouhlíkových technologií v oblasti nakládání energií a tím zvýšení využívání druhotných surovin. Na tento program dodává OPPIK přibližně 576 mil. Kč [4].

2 NÁVRH FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY

V praktické části této práce je cílem návrh hybridní fotovoltaické elektrárny s bateriovým úložištěm, která bude umístěna na střechu administrativní budovy se sídlem v Brně. Přínosem projektu je snížení nákladů na nákup elektrické energie a s tím související finanční úspory. Spotřební profil budovy udává největší využití elektrické energie přes den a přímo tím koresponduje s křivkou výroby elektrické energie z fotovoltaické elektrárny. Roční spotřeba objektu je 181 500 kWh, což při tarifu 4,328 Kč/kWh představuje 785 532 Kč. Při výstavbě projektu by bylo možné využít dotační prostředky z programu OPPIK - 2. výzva programu podpory Úspory energie – FV systémy s/bez akumulace pro vlastní spotřebu. Bohužel žádosti na využití tohoto programu skončily již v březnu roku 2018 a není tedy možné počítat s danou podporou. I přesto se návrh řídí podmínkami a platnou legislativou této dotační podpory. Předpokládaná investice bez započítání dotace je 2 160 610 Kč bez DPH.

2.1 Základní parametry návrhu

Pro přesné projektování FV systému pro konkrétní budovu je důležité znát před návrhem několik parametrů popisujících daný objekt. Mezi nejdůležitější parametry patří:

- poloha objektu
- roční spotřeba
- spotřební profil
- situační výkres objektu

Uvedením těchto parametrů se zjednodušuje návrh FV systému. Dalším krokem návrhu je použití návrhových a simulačních programů.

2.2 Návrhový software

V současné době je k dispozici velká škála návrhových a simulačních programů pro FV systémy. Programy mají různé využití podle potřeby a zkušeností projektanta. Návrhové programy můžeme rozdělit na ty, které podporují pouze 2D projektování a na ty, které umožňují i projektování ve 3D rozhraní. Oba typy programů umožňují následné simulace FV systémů. Pomocí těchto simulací můžeme získat přibližné hodnoty výkonu během celého roku a jiné parametry FV systémů. Nevýhodou 2D programů je nedostatečná přesnost a absence stínících objektů, které mají velký vliv na výsledky simulace. Programy podporující 3D rozhraní mají velkou výhodu, v tomto rozhraní je možné vytvořit 3D model celého blízkého prostředí FV systému, a díky této výhodě jsou daleko více využitelné při návrhu konkrétních FV systémů. Právě proto byl v této práci použit návrhový a simulační program PVSOL dodávaný německou firmou Valentine software.

2.3 PVSOL

Program PVSOL je velmi oblíbený v Německu a je také celosvětově uznávaný. Je určen především pro projektanty a montéry a nabízí různá rozhraní, takže je využitelný v různých úrovních návrhu FV systémů.

Samotný návrh FV systému je rozdělen do několika kroků:

- základní údaje projektu
- typ systému a klimatické podmínky
- profil spotřeby
- 3D design
- bateriový systém
- kabely a ochranné prvky na vedení
- výkresy
- ekonomická analýza
- výsledky simulace

Prvním krokem ovlivňujícím výsledky simulace při návrhu FV systému v návrhovém programu PVSOL je zvolení klimatických podmínek. V tomto kroku je zvolena poloha FV systému. Program PVSOL podle zadané polohy vybere z databáze klimatických podmínek potřebná data, která jsou dále využita pro výpočty a simulaci.

Dalším krokem je vytvoření spotřebního profilu. Program PVSOL nabízí výběr z předdefinovaných spotřebních profilů. Pro přesnější zjištění vlivu FV systému na vlastní spotřebu objektu je vhodné vložit naměřené hodnoty spotřeby objektu ve formátu hodinových hodnot za celý rok.

Velmi důležitým krokem je 3D design, tento krok je k dispozici, jen pokud projektant počítá při návrhu systému s 3D simulacemi. V tomto kroku je možné vytvořit 3D model budovy, na kterou bude umístěn FV systém a také 3D modely objektů, které způsobují zastínění systému, a to jak objekty vzdálené (stromy, komíny, vysoké budovy) tak i objekty umístěné na budově (satelity, komíny, vikýře). Po úspěšném vytvoření modelu budovy a jeho stínícího okolí je možné umístit na budovu, či v její blízkosti FV systém.

Po umístění FV panelů, dále program nabízí konfiguraci střídače s panely. Program PVSOL nabízí celou databázi běžně používaných FV komponentů, společně s jejich přesnými modely. Pro správnou konfiguraci je vhodné vybrat střídače s parametry, které odpovídají výkonu FV panelů, a tedy předpokládanému výkonu FV systému a program už sám dokáže určit nejvhodnější střídač pro daný FV systém.

Po nakonfigurování střídače program provádí simulaci stínění a umožňuje nahlédnout na výsledky simulace stínění. Po dalším nastavení bateriového systému (je-li obsažen v FV systému) a ochran na vedení, vyhodnocuje program simulaci celého systému a nabízí k prohlédnutí celou škálu výsledků. Závěrečným výstupem programu PVSOL je projektová dokumentace, která obsahuje veškeré informace o navrhovaném FV systému.

2.4 Fotovoltaická elektrárna s bateriovým úložištěm

Pro navrhovaný systém byl zvolen výkon FV elektrárny 26,68 kWp. Elektrárna je složena z 92 panelů o výkonu 290 Wp. Výkon FV elektrárny byl zvolen, aby splňoval podmínky dotačního programu, který by mohl tento projekt využívat. Podmínka pro udělení dotace je, že výkon elektrárny nesmí přesahovat 30 kWp. Zároveň byl určen úhel sklonu panelů na 10° kvůli zanedbatelnému vlivu síly větru na statiku budovy.

2.4.1 Poloha objektu

GPS souřadnice: 49.19 S, 16.62 V

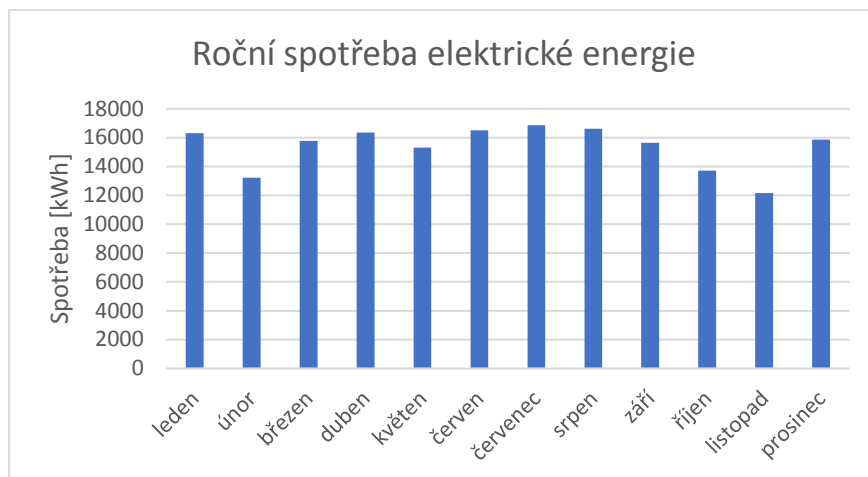
Objekt se nachází v městské části Brno – Cejl.



Obrázek 17: Satelitní snímek objektu

2.4.2 Roční spotřeba a spotřební profil

Roční spotřeba objektu je 181 500 kWh. Jelikož se jedná o administrativní budovu, ve které je umístěno call centrum nabývá denní spotřební profil tvaru „želvy“. Ráno je spotřeba nejmenší, od 6. hodiny ranní spotřeba plynule stoupá, až se ustálí na téměř konstantní hodnotu kolem poledne a přibližně k 18. hodině odpoledne spotřeba opět klesá. Roční spotřební profil se nijak výrazně nemění a je téměř konstantní. To je způsobeno využíváním klimatizačních jednotek v letním období a elektrického topení v období zimy. Spotřeba těchto zařízení má téměř stejný vliv na celoroční spotřebu.



Obrázek 18: Roční spotřební profil

2.4.3 3D model objektu

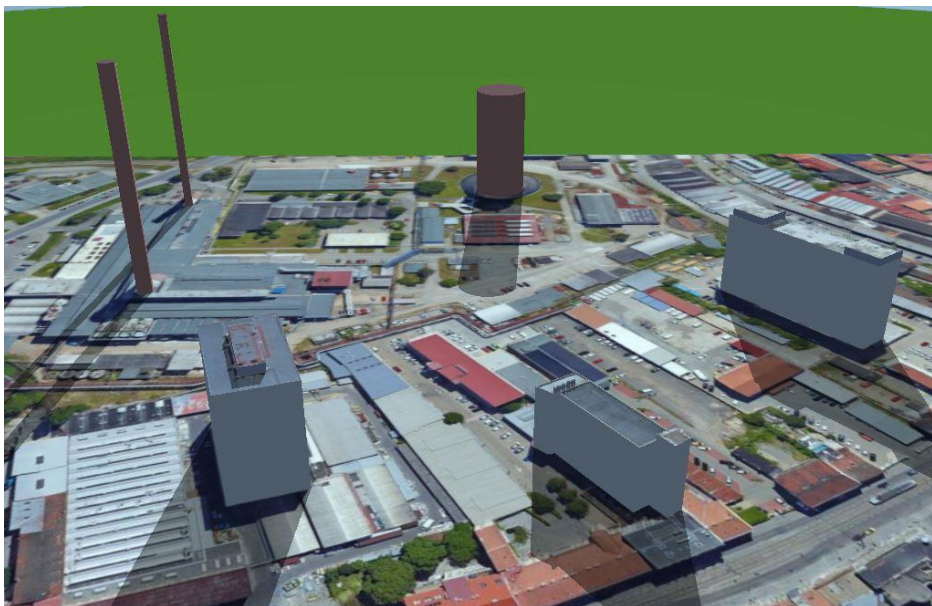
Tento 3D model byl vytvořen v programu PVSOL pomocí nástroje „vytažení z mapy“. Tento nástroj umožňuje jednoduše vytvářet 3D modely objektů pomocí satelitních fotografií. Tyto snímky je možné pořídit přímo v programu PVSOL, který využívá snímky z aplikace Google Maps. Jsou-li k dispozici přesné rozměry objektu jsou tyto modely velmi přesné, což dále zpřesňuje simulace a výpočty programu.



Obrázek 19: 3D model objektu

2.4.4 3D model objektu a jeho stínícího prostředí

Pro přesnou simulaci vlivu zastínění byly vytvořeny 3D modely objektů, které způsobují zastínění FV systému.



Obrázek 20: 3D model objektu a jeho stínícího prostředí

2.4.5 Výsledek simulace stínění

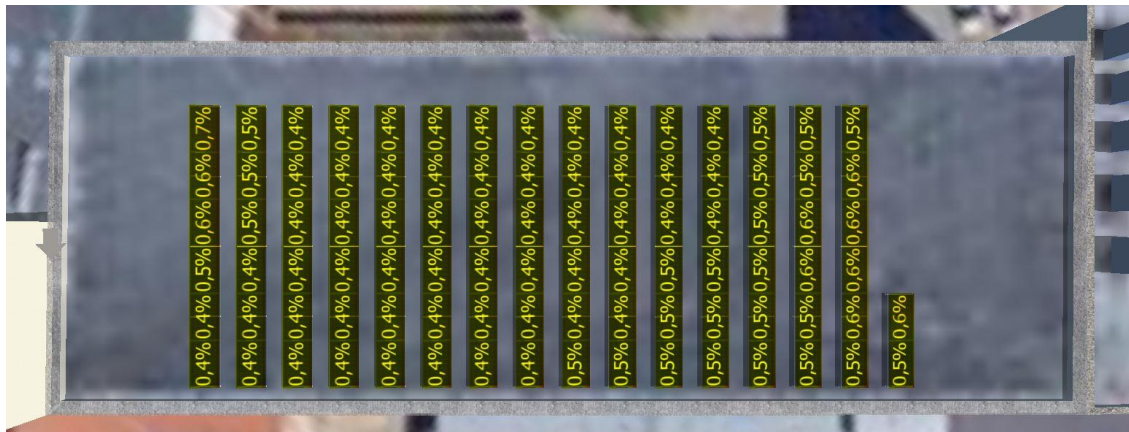


Obrázek 21: Simulace stínění

Po provedení simulace je jasně vidět vliv zastínění. Vpravo na obrázku 21 můžeme vidět zastínění panelů umístěných v blízkosti klimatizačních jednotek. Vlevo na obrázku je vidět zastínění budovou, na které je systém umístěn. Zastínění panelů umístěných ve středu střechy je způsobeno stíněním okolních vzdálených objektů.

Po vyhodnocení simulace stínění byly umístěny FV panely tak, aby byly zastíněny co nejméně a co nejvíce rovnoměrně. Nerovnoměrnost zastínění panelů prudce snižuje generovaný výkon panelů připojených do série. Dalším vlivem rozmístění panelů je požární bezpečnost. U panelů umístěných na rovné střeše se musí ponechat minimálně 1 m široký pruh podél delší strany.

2.4.6 Výsledné rozmístění FV panelů



Obrázek 22: Rozmístění FV panelů

V příloze 2 na straně 22 je zobrazen okótovaný výkres rozmístění panelů.

2.4.7 Konfigurace střídače

Pro navrhovaný systém byl zvolen jako nejvýhodnější střídač od firmy GoodWe. Tento střídač je třífázový a beztransformátorový s maximálním vstupním výkonem 32,5 kW. Střídač je nadimenzován na vyšší výkon, aby se zamezilo jeho poškození při vyšších hodnotách generovaného výkonu z FV panelů. K vysokým hodnotám výkonu může dojít v zimním období při nízkých teplotách a vysokém osvitu. Střídač obsahuje 2 sledovače optimálního výkonu. Do každého sledovače jsou zapojeny 2 stringy po 23 panelech.

2.4.8 Zapojení panelů



Obrázek 23: Zapojení panelů do stringů

Výkres s náhledem na zapojení panelů je zobrazen v příloze 1. Panely jsou zapojeny tzv. meandrovitým způsobem.

2.4.9 Komponenty fotovoltaického systému

Katalogové listy použitých komponent jsou zobrazeny v příloze 2 na straně 18.

Panely

92x Axitec AC 290P

Střídač

1x GoodWe GW25K-DT-RS485

Hybridní měnič

2x SMA Sunny Island 6.0H

Baterie

2x BYD B-BOX 13.8

2.4.10 Schéma elektrického zapojení a ochrany na vedení

Navrhovaný systém je zapojen v koncepci hybridního FV systému. Schéma je zobrazeno v příloze 2 na straně 21. Do FV systému byly zakomponovány přepětíové ochrany, uzemněné ochrany proti přepětí (bleskojistky) a bezpečnostní odpojovače. Na DC straně vedení (před střídačem) jsou umístěny jističe, které se vypnou při příliš vysokém napětí na vedení. Tyto jističe lze také využít jako odpojovače DC strany. Dále je za jističi umístěna přepětíová ochrana neboli ochrana proti blesku. Na AC straně vedení (za střídačem) je umístěný bezpečnostní odpojovač a také přepětíová ochrana. Ve střídači je integrována přepětíová ochrana a odpínač DC proudu.

2.4.11 Vliv bateriového systému

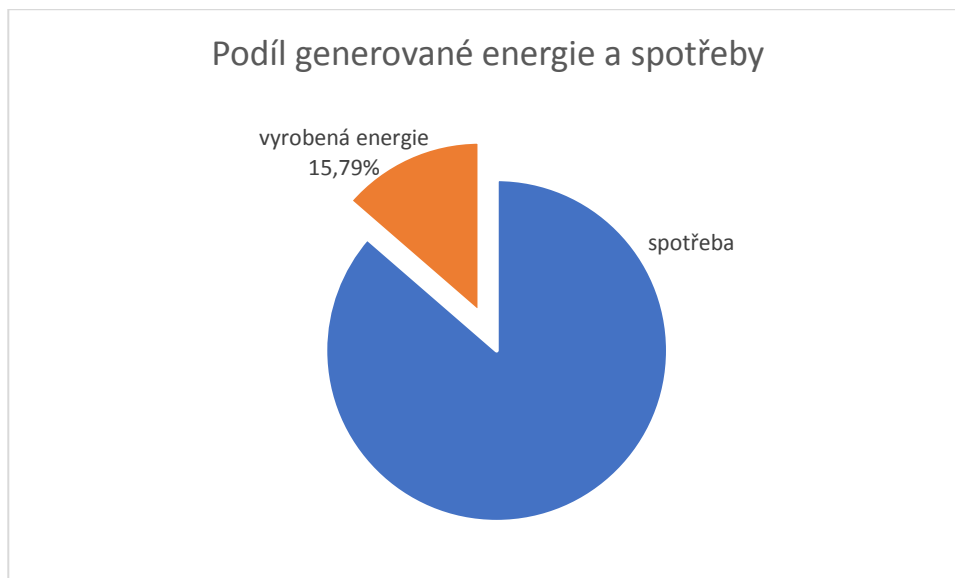
Jelikož činí celková roční spotřeba objektu 181,5 MWh, nemají baterie o celkové kapacitě 27,6 kWh velký vliv na pokrytí elektrické energie. Rozdíl podílu vlastní spotřeby v systému bez akumulace a s akumulací je v tomto případě pouze 3 %. I přes malé využití můžou být baterie užitečné. Dojde-li k výpadku distribuční sítě, můžou baterie sloužit jako záložní systém pro nezbytné součásti zabezpečovacího systému budovy. Velkou výhodou je také vyšší míra dotace u systémů s akumulací.

2.4.12 Degradace FV panelů

Panely snižují svůj výkon vlivem působícího slunečního záření. V navrhovaném systému byla použita degradace 17 % výkonu během 20 let [17]. Při výraznější degradaci může dojít k takovému snížení výkonu panelu, že je nutné daný panel vyměnit, což způsobuje zvýšení nákladů FV systému.

2.5 Výsledky simulací

Po provedení kompletního návrhu FV systému byly vygenerovány výsledky simulací, spolu s projektovou dokumentací viz. příloha 2. Na obrázku 24 můžeme vidět podíl roční generované energie vůči celkové spotřebě za jeden rok. Vyrobená energie pokryje 15,79 % celkové spotřeby a tím, byť nepatrně může zajistit snížení nákladů na energii.

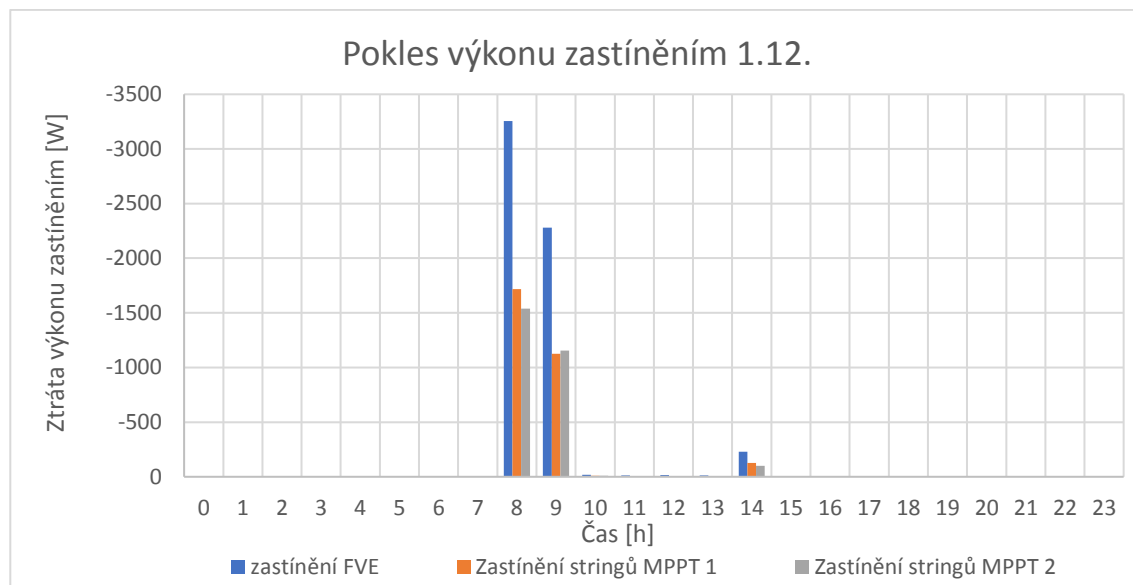


Obrázek 24: Podíl vyrobené energie a spotřeby

Přehledné výsledky simulace FV systému jsou zobrazeny v příloze 2 na straně 9. Celková vyrobená energie FV generátoru činí 28 282 kWh/rok. Z vyrobené energie se téměř všechna energie spotřebuje přímo v budově (99,5 %). Do distribuční sítě přeteče pouze 137 kWh/rok. I když je téměř všechna vyrobená energie spotřebována přímo, je stupeň soběstačnosti pouze 15,2 %. Tok energie v systému je zobrazen v příloze 2 na straně 10. Na grafu krytí celkové spotřeby v příloze 2 na straně 12 jasně vidíme, jak málo je využívaná energie z bateriového systému. Zároveň zde vidíme pokrytí celkové spotřeby energií z FV generátoru a také to, že většina spotřeby je pokryta energií ze sítě.

2.5.1 Vliv zastínění

Na obrázku 25 můžeme vidět vliv zastínění FV systému pro den 1.12. Tento den byl vybrán z důvodu značného vlivu zastínění FV systému v zimních měsících, kdy je sluneční energie velmi málo. Je zde vidět znatelný vliv zastínění v ranních hodinách způsobený klimatizačními jednotkami umístěnými poblíž FV panelů. I když je systém zastíněn pouze 2 hodiny, způsobuje zastínění značné ztráty výkonu, které musí být vyrovnány dodávkou energie ze sítě.



Obrázek 25: Pokles výkonu způsobený zastíněním

2.5.2 Analýza hospodárnosti

Přehled finanční analýzy je zobrazen v příloze 2 na straně 14. Popisuje FV systém po finanční stránce. Investiční náklady na FV systém byly odhadnuty na 2 064 271,62 Kč. Polovinu této částky tvoří náklady na komponenty systému. Druhou polovinu tvoří náklady na instalaci a na veškeré projektování. Podpora je ve výši 65 % investičních nákladů. Výše podpory byla odhadem zvolena mezi výší podpory pro střední a pro velké podniky podle dotačního programu, který by navrhovaný FV systém mohl využívat. Dále byla odhadnuta částka na roční náklady 25 791 Kč. Tato částka slouží pro pokrytí nákladů na údržbu FV systému.

2.5.3 Návratnost

Po instalaci FV systému je výše úspor za energii přibližně 133 000 Kč. Odečteme-li náklady na údržbu získáme roční úspory nákladů za elektrickou energii ve výši asi 110 000 Kč. Při stejné úspoře každý rok je návratnost pouhých 6,6 let. To znamená, že za skoro 7 let ušetří FV systém stejnou částku jako byla počáteční investice s dotací.

3 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce byl popis fotovoltaického děje, využití solární energie, rozbor technologií solárních článků a baterií a návrh fotovoltaického systému.

V první části této práce jsou popsány a teoreticky rozebrány všechny jevy související s výrobou elektrické energie z energie solární. Stručně je popsáno využití sluneční energie a její přeměna na energii elektrickou pomocí fotovoltaického jevu. V této části je také popsán proces výroby fotovoltaických článků a vývoj materiálů pro jejich výrobu. Dále se teoretická část práce zabývá konstrukcí fotovoltaických panelů, popisem fotovoltaického systému a jeho koncepce včetně dalších komponent fotovoltaického systému jako jsou střídače, baterie a nabíjecí regulátory. Na konec této části jsou popsány způsoby zapojení fotovoltaické elektrárny do distribuční sítě.

Dále je v bakalářské práci popsána platná legislativa ČR v oblasti fotovoltaiky. Práce také obsahuje bezpečnostní předpisy pro fotovoltaickou elektrárnu, včetně platných norem. Závěrem jsou popsány aktuální dotační programy podporující výrobu energie z obnovitelných zdrojů.

V praktické části je zpracován návrh fotovoltaické elektrárny s bateriovým úložištěm pro firmu. Návrh je vytvořen v návrhovém programu PVSOL. Výstupem praktické části je projektová dokumentace, obsažena v příloze 2. Tato projektová dokumentace a postup při navrhování systému je rozebrán na konci práce.

Důležitým cílem praktické části této práce bylo navrhnout fotovoltaickou elektrárnu, která by snížila náklady na elektrickou energii budovy, na které bude systém uložen. Podle simulací jsou náklady po nainstalování fotovoltaické elektrárny sníženy o 15,79 %.

LITERATURA

- [1] DA ROSA, Aldo Vieira. *Fundamentals of renewable energy processes*. 2nd ed. Boston: Elsevier Academic Press, c2009. ISBN 978-0-12-374639-9.
- [2] VLČEK, Josef. *Automatické vyhodnocování spektra slunečního záření* [online]. Brno, 2015 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/40245>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Špinka.
- [3] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu*. Ostrava: HEL, 2011. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [4] HASELHUHN, Ralf a Petr MAULE. *Fotovoltaické systémy: energetická příručka pro elektrikáře, techniky, instalatéry, projektanty, architekty, inženýry, energetiky, manažery, stavitele, studenty, učitele, ostatní odborné a profesní soukromé nebo veřejné instituce a zájemce o fotovoltaický obor a energetickou nezávislost*. Plzeň: Česká fotovoltaická asociace, 2017. ISBN 978-80-906281-5-1.
- [5] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [6] Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny. *Czech Nature Energy* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/>.
- [7] Transformerless Inverters for Solar PV. *Civic Solar* [online]. 2011 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.civicsolar.com/support/installer/articles/transformerless-inverters-solar-pv>.
- [8] *Optimization of Battery Energy Storage Systems for PV Grid Integration Based on Sizing Strategy* [online]. Tallahassee, Florida, 2014 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://fsu.digital.flvc.org/islandora/object/fsu%3A252910>. Disertace. Florida State University.
- [9] KRATOCHVÍLA, Lukáš. *Systém pro správu Li-ion baterie* [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/67392>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Lukáš Kopečný.
- [10] *How to choose the best battery for a solar energy system*. *Energysage* [online]. 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.energysage.com/solar/solar-energy-storage/what-are-the-best-batteries-for-solar-panels/>.
- [11] Pylontech US2000 Plus - 2,4 kWh. In: *IBG* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://www.ibg.cz/wp-content/uploads/2019/04/Pylontech-US2000-Plus-TYP_cz.pdf
- [12] GOOWEI ENERGY OT26-12 W. In: *I4wifi* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.i4wifi.cz/cs/211254-baterie-goowei-energy-ot26-12w>
- [13] Solar power. *Nova Sun Power* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://novasunpower.com/>.
- [14] §4 odst. 5 písm. d) zákona č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie.
- [15] §103 odst. 1 písm. c) zákona č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu.
- [16] *Elektro* [online]. 2011, (4) [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/pozarni-bezpecnost-fotovoltaickych-systemu--9835>.

- [17] KLADIVA, Roman. *Dlouhodobé sledování parametrů fotovoltaiických panelů*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav Elektrotechnologie, 2013. 98 s. Vedoucí práce byl Ing. Roman Gvritishvili.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

λ	Vlnová délka.
Hz	Frekvence.
kWh	Spotřeba elektrické energie.
Wp	Výkon FV panelu.
Wm^{-2}	Hustota výkonu.
AC	Alternating Current, střídavý proud.
DC	Direct Current, stejnosměrný proud.
ERÚ	Energetický regulační úřad.
EVA	Ethylenvinylacetát.
IGBT	Insulated gate bipolar transistor.
MOSFET	Metal oxide semiconductor field effect transistor.
MPPT	Maximum power point tracking, sledovač maximálního výkonu.
OPPIK	Operační program podnikání a inovace pro konkurenceschopnost.

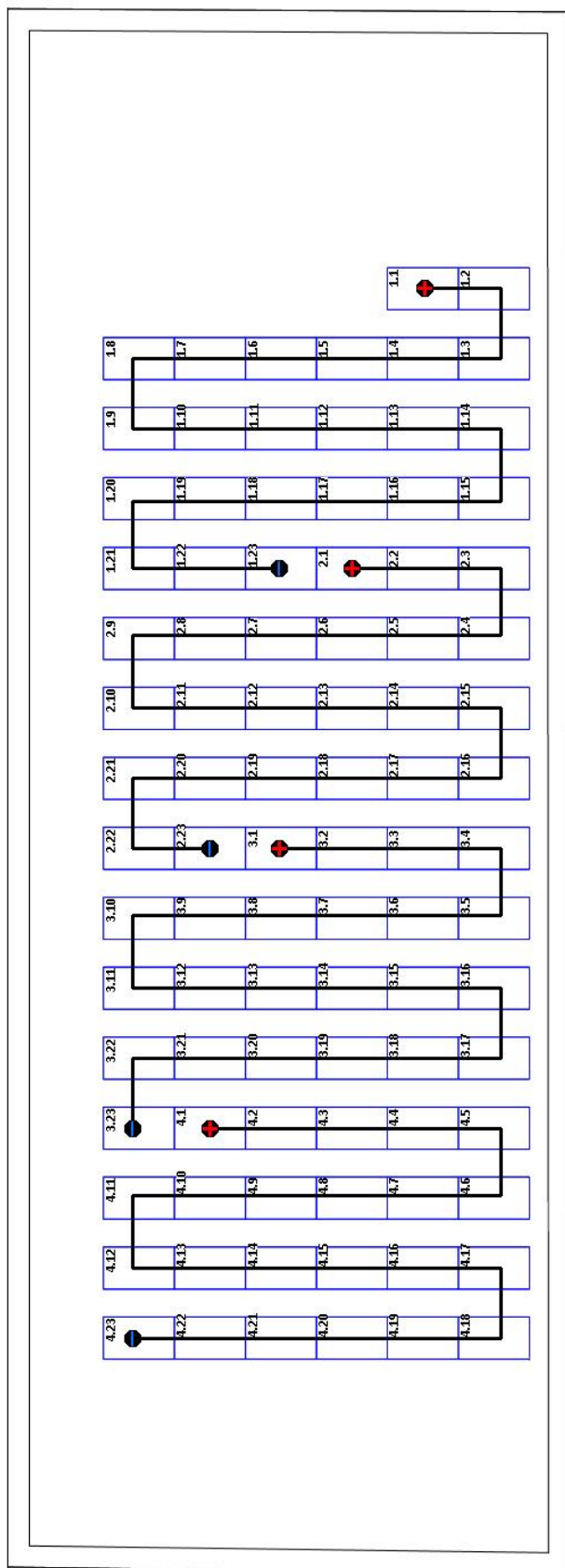
SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Závislost výkonu záření na vlnové délce záření [2]	8
Obrázek 2: Struktura FV článku [3]	9
Obrázek 3: Druhy fotovoltaických článků [4]	10
Obrázek 4: Výroba monokrystalických a polykrystalických FV článků [4]	11
Obrázek 5: Porovnání polykrystalického a monokrystalického FV článku [5]	12
Obrázek 6: Konstrukce fotovoltaického panelu [6]	14
Obrázek 7: Princip FV systému s jedno- nebo třífázovým střídačem [4]	15
Obrázek 8: Koncepce zapojení střídačů [5]	16
Obrázek 9: Vnitřní zapojení střídače s VF transformátorem [5]	17
Obrázek 10: Vnitřní zapojení střídače bez transformátoru [5]	17
Obrázek 11: Lithiový a olověný akumulátor [11] [12]	19
Obrázek 12: Koncepce ostrovního systému	21
Obrázek 13: Systém připojený k distribuční síti	21
Obrázek 14: Hybridní FV systém s akumulací	22
Obrázek 15: Zapojení systému v zeleném bonusu [5]	23
Obrázek 16: Zapojení systému ve výkupním tarifu [5]	23
Obrázek 17: Satelitní snímek objektu	30
Obrázek 18: Roční spotřební profil	31
Obrázek 19: 3D model objektu	31
Obrázek 20: 3D model objektu a jeho stínícího prostředí	32
Obrázek 21: Simulace stínění	32
Obrázek 22: Rozmístění FV panelů	33
Obrázek 23: Zapojení panelů do stringů	33
Obrázek 24: Podíl vyrobené energie a spotřeby	35
Obrázek 25: Pokles výkonu způsobený zastíněním	36

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1: ZAPOJENÍ PANELŮ	42
PŘÍLOHA 2: PROJEKTOVÁ DOKUMENTACE	43

PŘÍLOHA 1: ZAPOJENÍ PANELŮ



PŘÍLOHA 2: PROJEKTOVÁ DOKUMENTACE

Název projektu: Hybridní fotovoltaická elektrárna s
bateriovým úložištěm

21.05.2019

Dokumentace

Údaje o zákazníkovi

Podnik
Číslo zákazníka
Kontaktní osoba
Adresa
Telefon
Fax
E-Mail

Projektová data

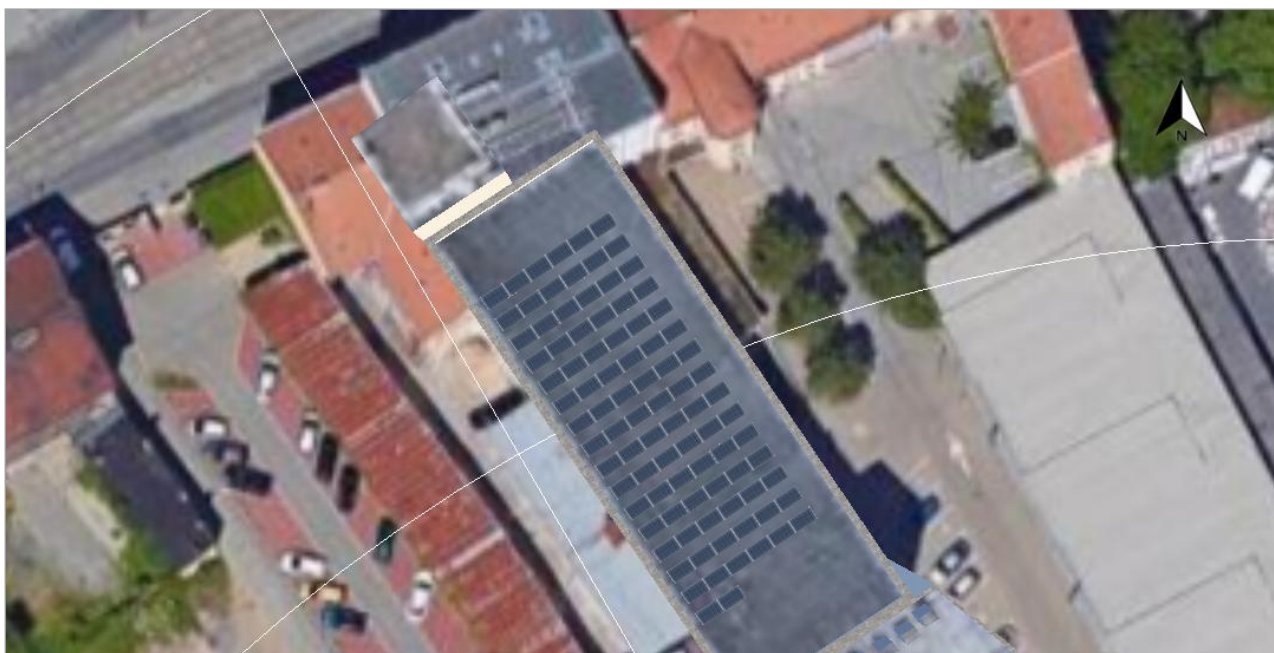
Název projektu	Hybridní fotovoltaická elektrárna s bateriovým úložištěm
Nabídka číslo	
Zpracoval(a)	Filip Šmatlo
Adresa	Brno



Popis projektu:

Fotovoltaický systém je umístěn na střeše administrativní budovy. Navrhovaný systém bude sloužit ke snížení nákladů na nákup elektrické energie.

Přehled projektu



Obrázek: Obrazový přehled, 3D design

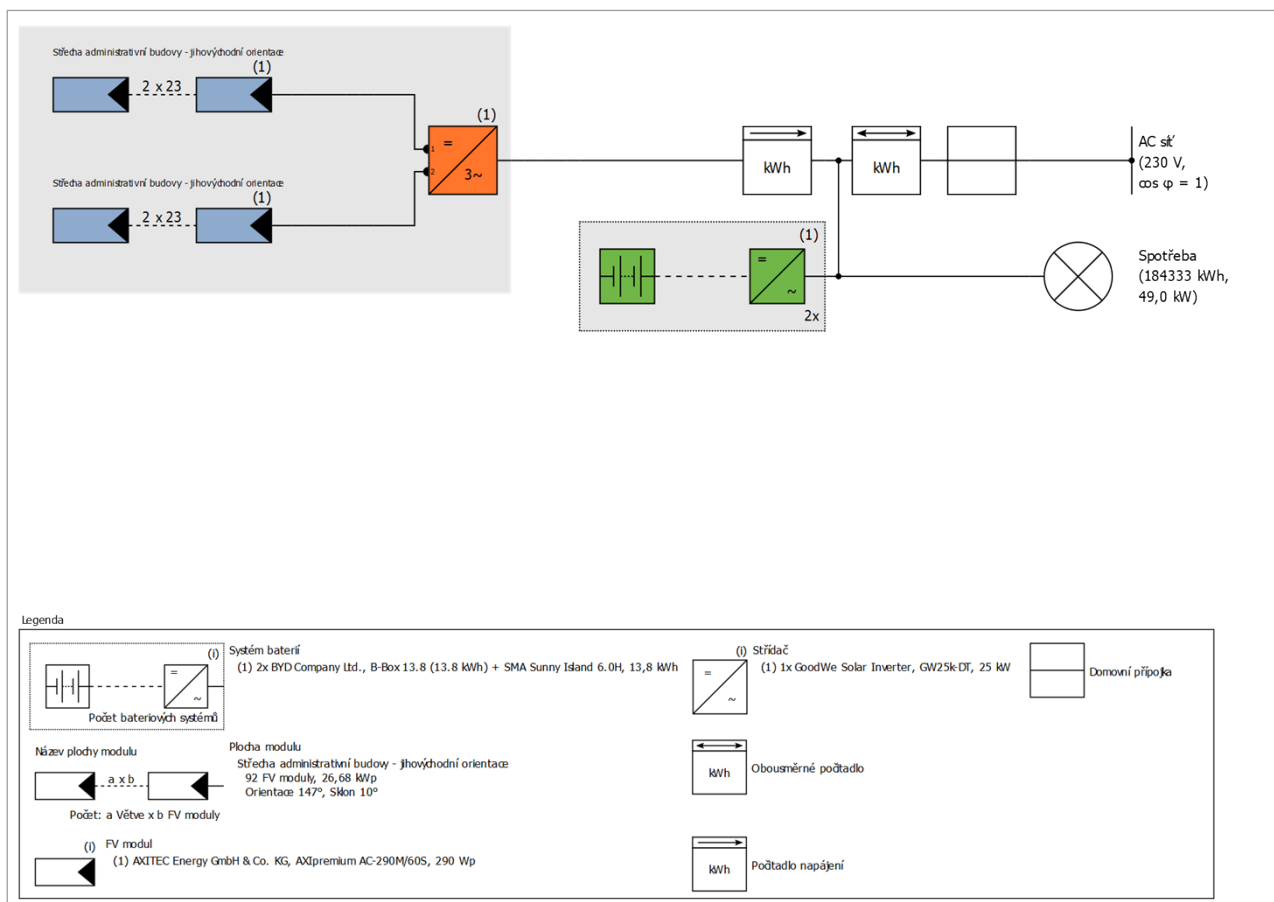
FV zařízení

3D, FV zařízení připojené do sítě s elektrickými spotřebiči a systémem baterií

Klimatická data	Brno, CZE (1991 - 2010)	
Výkon FV generátoru	26,68	kWp
Povrch FV generátoru	149,7	m ²
Počet FV modulů	92	
Počet měničů	1	
Počet bateriových systémů	2	

Hybridní fotovoltaická elektrárna s bateriovým úložištěm

Zpracoval(a): Filip Šmatlo



Obrázek: Schéma zapojení

Výnos

Výnos

Energie FV generátoru (AC síť)	28 282 kWh
Přímá vlastní spotřeba	27 489 kWh
Kapacita baterie	655 kWh
Síťové napájení	137 kWh
Deregulace na napájecí bodu	0 kWh
Podíl vlastní spotřeby	99,5 %
Stupeň soběstačnosti	15,2 %
Spec. Roční výnos	1 060,03 kWh/kWp
Stupeň využití zařízení (PR)	89,6 %
Snížení výnosu zastíněním	2,3 %/Rok
Snížení emisí CO ₂	16 907 kg/rok

Hybridní fotovoltaická elektrárna s bateriovým úložištěm

Zpracoval(a): Filip Šmatlo

Finanční analýza

Váš zisk

Celkové investiční náklady	2 064 271,62 Kč
Celková kapitálová rendita	15,38 %
Doba amortizace	6,6 Roky
Vlastní výrobní náklady elektrické energie	2,27 Kč/kWh
Energy Balance/Feed-in Concept	Napájení přebytkem

Výsledky byly zjištěny matematickým modelovým výpočtem firmy Valentin Software GmbH (algoritmy PV*SOL). Skutečné výnosy solární elektrárny se mohou lišit z důvodu výkyvů počasí, stupně účinnosti modulů a měničů a také jiných faktorů.



Konstrukce zařízení

Přehled

Data zařízení

Druh zařízení	3D, FV zařízení připojené do sítě s elektrickými spotřebiči a systémem baterií
Začátek provozu	03.05.2019

Klimatická data

Lokalita	Brno, CZE (1991 - 2010)
Řešení dat	1 h
Použité simulační modely:	
- Difúzní záření na vodorovné rovině	Hofmann
- Ozařování na skloněnou plochu	Hay & Davies

Spotřeba

Celková spotřeba	184333 kWh
e_on	184333 kWh
Špičkové zatížení	49 kW

Plochy modulů

1. Plocha modulu - Střecha administrativní budovy - jihovýchodní orientace

FV generátor, 1. Plocha modulu - Střecha administrativní budovy - jihovýchodní orientace

Jméno	Střecha administrativní budovy - jihovýchodní orientace
FV moduly	92 x AXIpremium AC-290M/60S
Výrobce	AXITEC Energy GmbH & Co. KG
Sklon	10 °
Orientace	Jihovýchod 147 °
Situace při vestavbě	Montáž na stojanech na střeše
Povrch FV generátoru	149,7 m ²



Obrázek: 1. Plocha modulu - Střecha administrativní budovy - jihovýchodní orientace

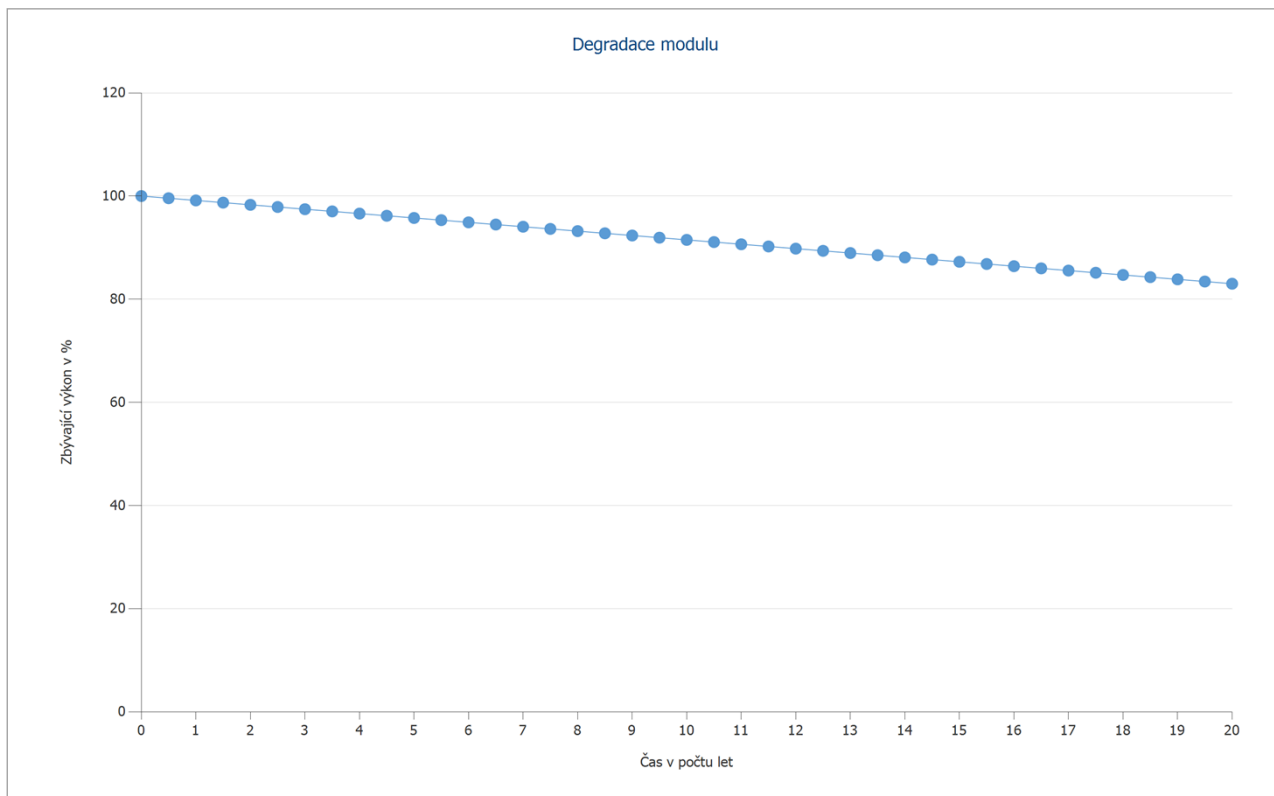
Hybridní fotovoltaická elektrárna s bateriovým úložištěm

Zpracoval(a): Filip Šmatlo

Degradace modulu, 1. Plocha modulu - Střecha administrativní budovy - jihovýchodní orientace

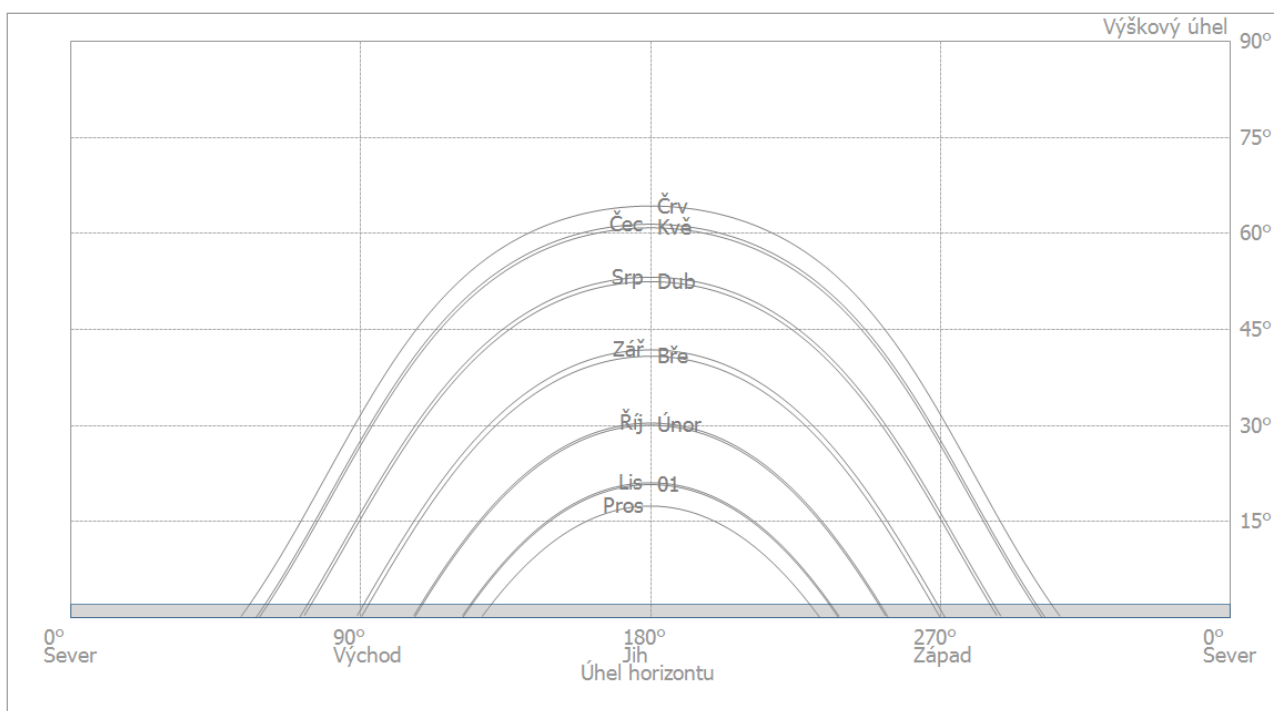
Zbývající výkon po 20 letech

83 %



Obrázek: Degradace modulu, 1. Plocha modulu - Střecha administrativní budovy - jihovýchodní orientace

Linie horizontu, 3D design



Obrázek: Horizont (3D design)

Hybridní fotovoltaická elektrárna s bateriovým úložištěm

Zpracoval(a): Filip Šmatlo

Konfigurace měniče

Propojení 1

Plocha modulu	Střecha administrativní budovy - jihovýchodní orientace
Střídač 1	
Výrobce	GoodWe Solar Inverter
Model	GW25k-DT
Počet	1
Faktor definování vlastností	106,7 %
Propojení	MPP 1: 2 x 23
	MPP 2: 2 x 23

AC síť

AC síť

Počet fází	3
Síťové napětí (jednofázové)	230 V
Koeficient elektrické indukce (cos phi)	+/- 1

Bateriové systémy

Systém baterií

Výrobce	BYD Company Ltd.
Model	B-Box 13.8 (13.8 kWh) + SMA Sunny Island 6.0H
Počet	2
Měnič baterie	
Typ připojení	AC připojení
Jmenovitý výkon	5,3 kW
Baterie	
Výrobce	BYD Company Ltd.
Model	B-Box 13.8
Počet	1
Energie baterie	13,8 kWh
Battery Type	Lithiumiontové
Active material	Lithium-železo-fosfát

Výsledky simulace

Výsledky Celkové zařízení

FV zařízení

Výkon FV generátoru	26,7 kWp
Spec. Roční výnos	1 060,03 kWh/kWp
Stupeň využití zařízení (PR)	89,6 %
Snížení výnosu zastíněním	2,3 %/Rok
Energie FV generátoru (AC síť)	28 282 kWh/Rok
Přímá vlastní spotřeba	27 489 kWh/Rok
Síťové napájení	137 kWh/Rok
Deregulace na napájecí bodu	0 kWh/Rok
Kapacita baterie	655 kWh/Rok
Podíl vlastní spotřeby	99,5 %
Snížení emisí CO ₂	16 907 kg/rok

Spotřebič

Spotřebič	184 333 kWh/Rok
Spotřeba v provozní pohotovosti (Střídač)	0 kWh/Rok
Celková spotřeba	184 333 kWh/Rok
pokryto FV	27 489 kWh/Rok
pokryto sítí	156 265 kWh/Rok
pokryto baterií netto	579 kWh/Rok

Systém baterií

Dobití na začátku	28 kWh
Kapacita baterie (Celkem)	655 kWh/Rok
Kapacita baterie (FV zařízení)	655 kWh/Rok
Kapacita baterie (Síť)	0 kWh/Rok
Energie baterie k pokrytí spotřeby	579 kWh/Rok
Ztráty nabíjením/vybíjením	92 kWh/Rok
Ztráty v baterii	12 kWh/Rok
Cyklické zatížení	0,4 %
Životnost	>20 Roky

Stupeň soběstačnosti

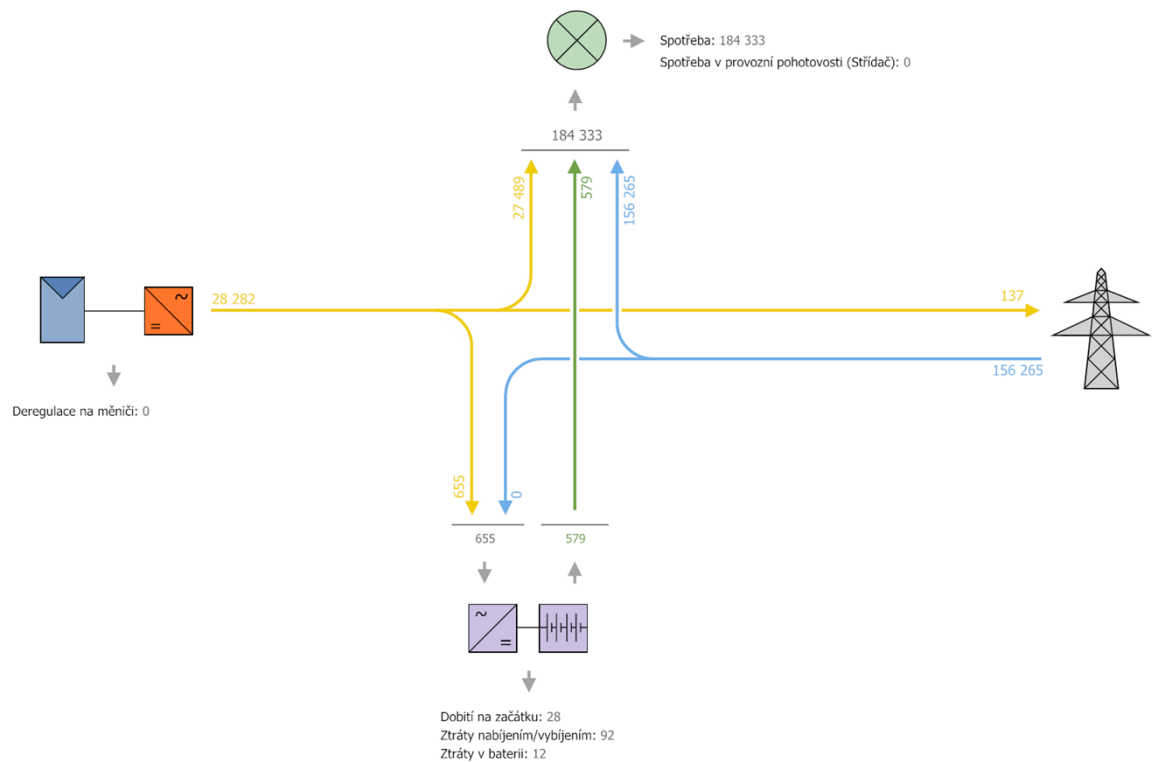
Celková spotřeba	184 333 kWh/Rok
pokryto sítí	156 265 kWh/Rok
Stupeň soběstačnosti	15,2 %

Hybridní fotovoltaická elektrárna s bateriovým úložištěm

Zpracoval(a): Filip Šmatlo

Tok energie grafika

Projekt: Hybridní fotovoltaická elektrárna s bateriovým úložištěm



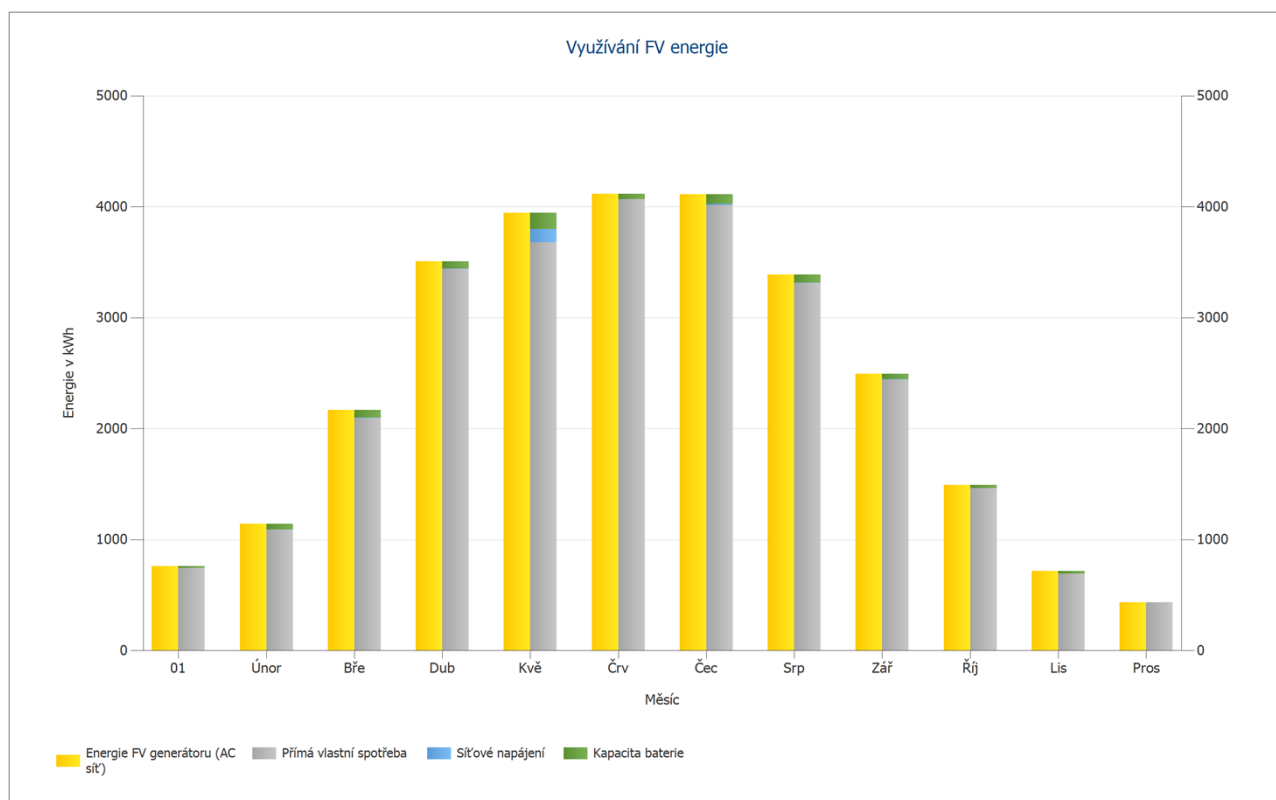
Obrázek: Tok energie grafika

Hybridní fotovoltaická elektrárna s bateriovým úložištěm

Zpracoval(a): Filip Šmatlo



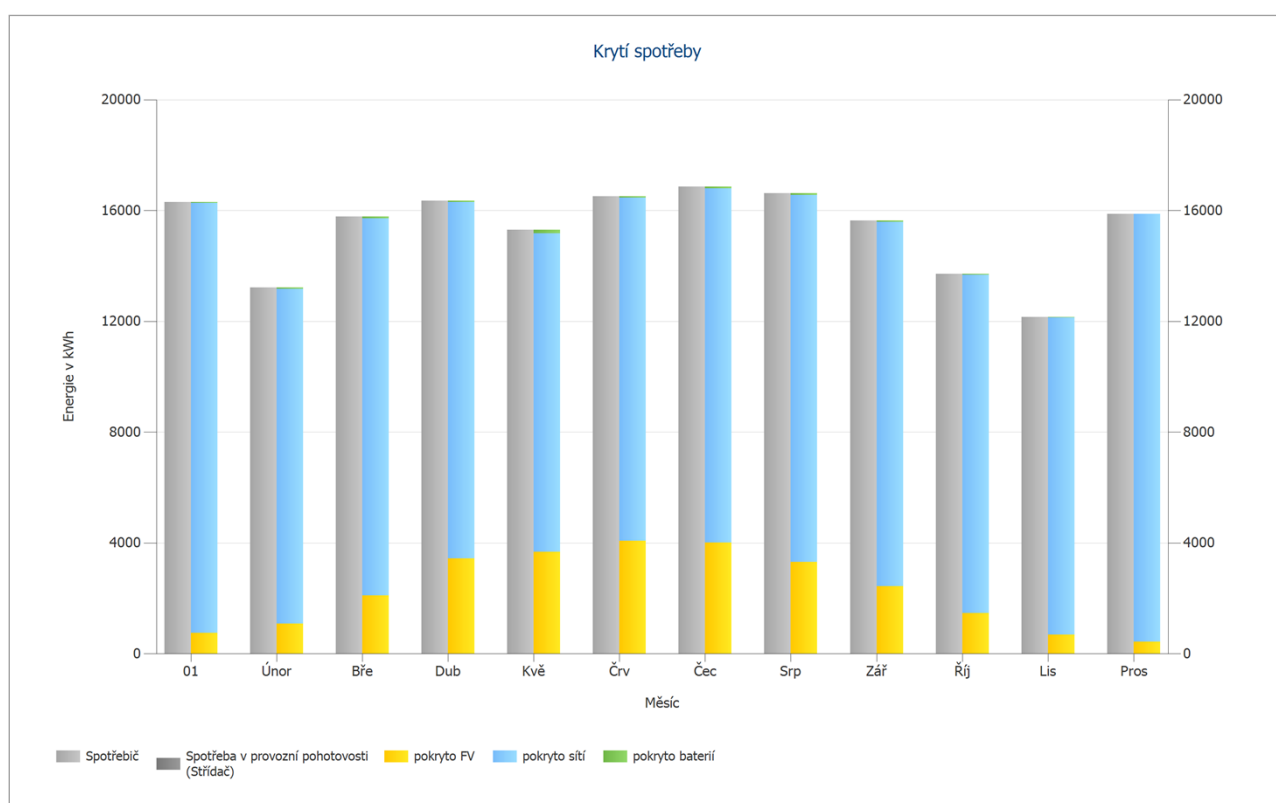
Obrázek: Prognóza výnosů se spotřebou



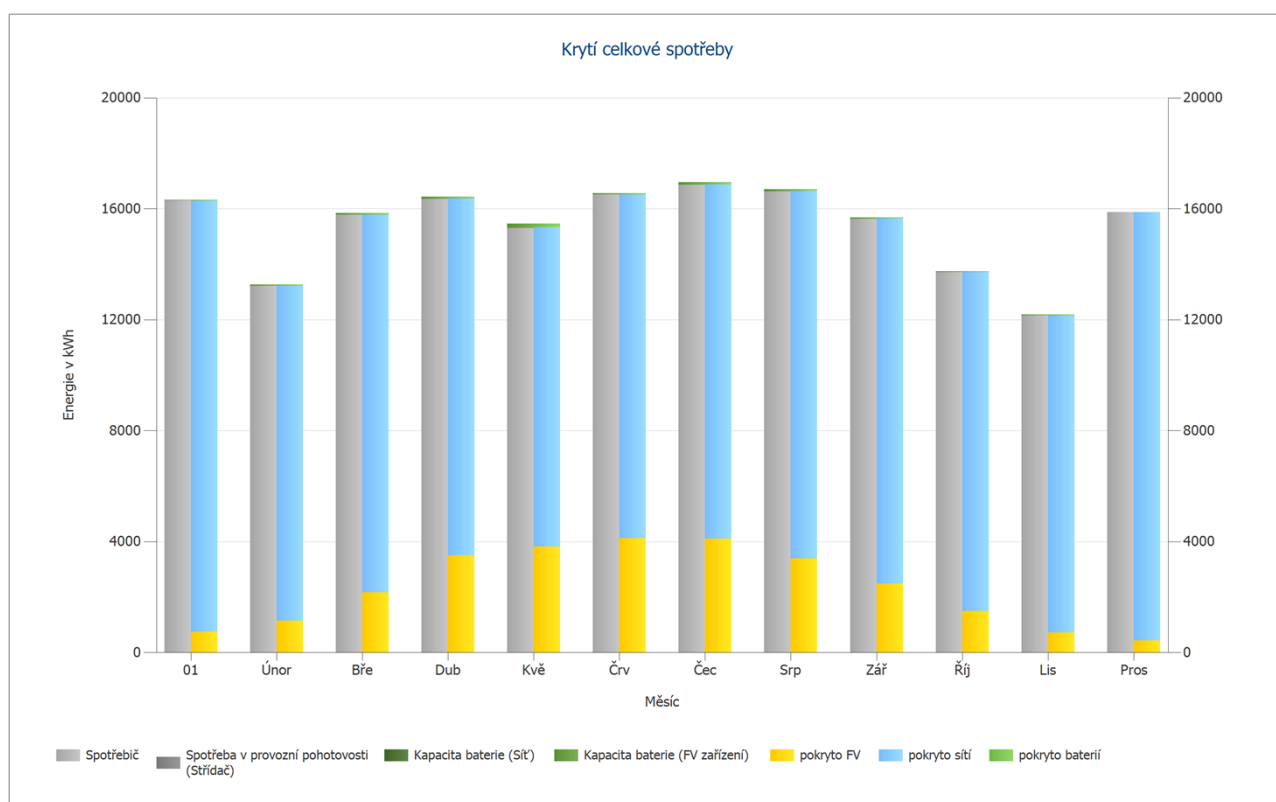
Obrázek: Využívání FV energie

Hybridní fotovoltaická elektrárna s bateriovým úložištěm

Zpracoval(a): Filip Šmatlo



Obrázek: Krytí spotřeby



Obrázek: Krytí celkové spotřeby

Výsledky na plochu modulu

Energetická bilance FV zařízení

Energetická bilance FV zařízení

Globální záření horizontální	1 149,47 kWh/m²	
Odchylka od standardního spektra	-11,49 kWh/m ²	-1,00 %
Odraz od země (albedo)	1,73 kWh/m ²	0,15 %
Vyrovňání a sklon úrovně modulu	52,33 kWh/m ²	4,59 %
Odstínění podle modulu	-8,58 kWh/m ²	-0,72 %
Odraz na povrchu modulu	-28,24 kWh/m ²	-2,39 %
Globální záření na modul	1 155,21 kWh/m²	
	1 155,21 kWh/m ²	
	x 149,67 m ²	
	= 172 903,38 kWh	
FV globální záření	172 903,38 kWh	
Znečištění	0,00 kWh	0,00 %
STC konverze (stupeň jmenovitého výkonu modulu 17,83 %)	-142 081,31 kWh	-82,17 %
FV jmenovitá energie	30 822,07 kWh	
Odstínění dílů specifické pro modul	-390,26 kWh	-1,27 %
Chování ve slabém světle	0,96 kWh	0,00 %
Odchylka od jmenovité teploty modulu	-649,20 kWh	-2,13 %
Diody	-19,95 kWh	-0,07 %
Nesrovnalost (údaje výrobce)	-595,27 kWh	-2,00 %
Nesrovnalost (zapojení/odstínění)	-26,99 kWh	-0,09 %
Kabel propojení do série	-54,42 kWh	-0,19 %
FV energie (DC) bez sestupné regulace měničem	29 086,95 kWh	
Pokles pod výchozí výkon DC	0,00 kWh	0,00 %
Sestupná regulace z důvodu napěťového rozsahu MPP	-1,56 kWh	-0,01 %
Sestupná regulace z důvodu max. DC proudu	0,00 kWh	0,00 %
Sestupná regulace z důvodu max. DC výkonu	0,00 kWh	0,00 %
Sestupná regulace z důvodu max. AC výkonu/cos phi	0,00 kWh	0,00 %
Přizpůsobení MPP	-29,09 kWh	-0,10 %
FV energie (DC)	29 056,30 kWh	
Energie na vstupu WR	29 056,30 kWh	
Odchylka vstupního od jmenovitého napětí	-34,49 kWh	-0,12 %
DC/AC převod	-710,38 kWh	-2,45 %
Spotřeba v provozní pohotovosti (Střídač)	-0,34 kWh	0,00 %
AC vedení	-29,83 kWh	-0,11 %
FV energie (AC) bez pohotovostní spotřeby	28 281,26 kWh	
Energie FV generátoru (AC síť)	28 281,60 kWh	

Analýza hospodárnosti

Přehled

Data zařízení

Síťové napájení v prvním roce (včetně degradace modulů)	137 kWh/Rok
Výkon FV generátoru	26,7 kWp
Uvedení zařízení do provozu	03.05.2019
Sledované období	20 Roky
Úroky kapitálu	1 %

Hospodářské ukazatele

Celková kapitálová rendita	15,38 %
Kumulovaný finanční tok	1 619 954,06 Kč
Doba amortizace	6,6 Roky
Vlastní výrobní náklady elektrické energie	2,27 Kč/kWh

Přehled plateb

specifické investiční náklady	77 371,50 Kč/kWp
Investiční náklady	2 064 271,62 Kč
Jednorázové platby	0,00 Kč
Podpory	1 341 776,55 Kč
Roční náklady	25 791,00 Kč/Rok
Ostatní výnosy nebo úspory	0,00 Kč/Rok

Odměna za úspory

Celkové odměny v prvním roce	15,14 Kč/Rok
Úspory v prvním roce	135 004,44 Kč/Rok

Tarif - Firma

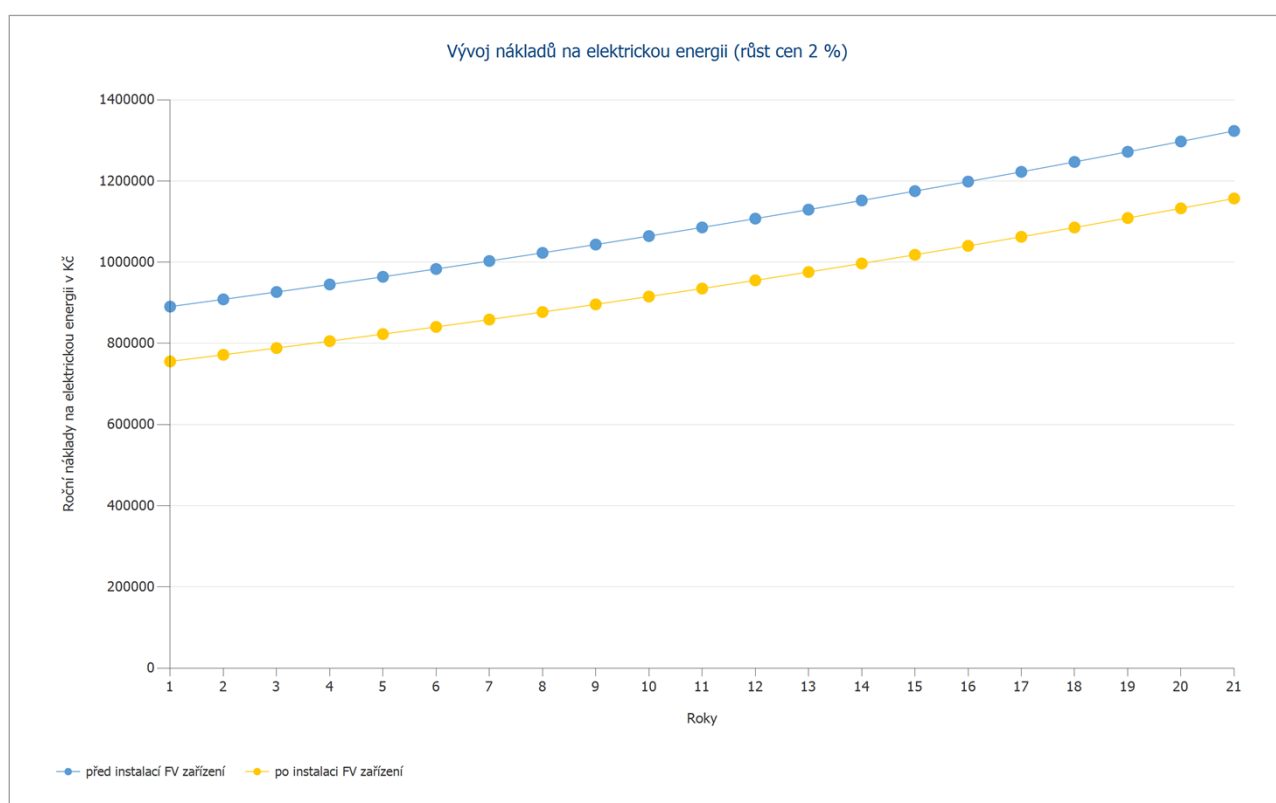
Platnost	03.05.2019 - 02.05.2039
Specifická odměna za napájení	0,1103 Kč/kWh
Úhrada za nabíjení	15,14 Kč/Rok

eon Tariff (EON)

Cena práce	4,83 Kč/kWh
Koeficient změny cen – cena práce	2 %/Rok

Hybridní fotovoltaická elektrárna s bateriovým úložištěm

Zpracoval(a): Filip Šmatlo



Obrázek: Vývoj nákladů na elektrickou energii (růst cen 2 %)

Hybridní fotovoltaická elektrárna s bateriovým úložištěm

Zpracoval(a): Filip Šmatlo

Cash flow

Tabulka peněžních toků

	Rok 1	Rok 2	Rok 3	Rok 4	Rok 5
Investice	-2 064 271,62 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Ostatní náklady	-25 535,64 Kč	-25 282,82 Kč	-25 032,49 Kč	-24 784,64 Kč	-24 539,25 Kč
Podpory	1 341 776,55 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Úhrada za nabíjení	14,16 Kč	14,72 Kč	14,45 Kč	14,18 Kč	13,92 Kč
Úspory při odběru proudu	133 428,59 Kč	133 838,74 Kč	134 000,00 Kč	134 151,34 Kč	134 292,52 Kč
Roční finanční tok	-614 587,95 Kč	108 570,64 Kč	108 981,96 Kč	109 380,88 Kč	109 767,18 Kč
Kumulovaný finanční tok	-614 587,95 Kč	-506 017,31 Kč	-397 035,35 Kč	-287 654,47 Kč	-177 887,29 Kč

	Rok 6	Rok 7	Rok 8	Rok 9	Rok 10
Investice	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Ostatní náklady	-24 296,29 Kč	-24 055,73 Kč	-23 817,56 Kč	-23 581,74 Kč	-23 348,26 Kč
Podpory	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Úhrada za nabíjení	13,66 Kč	13,40 Kč	13,15 Kč	12,90 Kč	12,66 Kč
Úspory při odběru proudu	134 423,41 Kč	134 543,60 Kč	134 653,16 Kč	134 751,53 Kč	134 838,83 Kč
Roční finanční tok	110 140,78 Kč	110 501,27 Kč	110 848,76 Kč	111 182,70 Kč	111 503,23 Kč
Kumulovaný finanční tok	-67 746,51 Kč	42 754,76 Kč	153 603,52 Kč	264 786,22 Kč	376 289,45 Kč

	Rok 11	Rok 12	Rok 13	Rok 14	Rok 15
Investice	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Ostatní náklady	-23 117,08 Kč	-22 888,20 Kč	-22 661,59 Kč	-22 437,21 Kč	-22 215,06 Kč
Podpory	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Úhrada za nabíjení	12,42 Kč	12,18 Kč	11,95 Kč	11,72 Kč	11,49 Kč
Úspory při odběru proudu	134 914,45 Kč	134 978,46 Kč	135 030,56 Kč	135 070,42 Kč	135 097,80 Kč
Roční finanční tok	111 809,78 Kč	112 102,44 Kč	112 380,92 Kč	112 644,92 Kč	112 894,22 Kč
Kumulovaný finanční tok	488 099,23 Kč	600 201,67 Kč	712 582,59 Kč	825 227,51 Kč	938 121,73 Kč

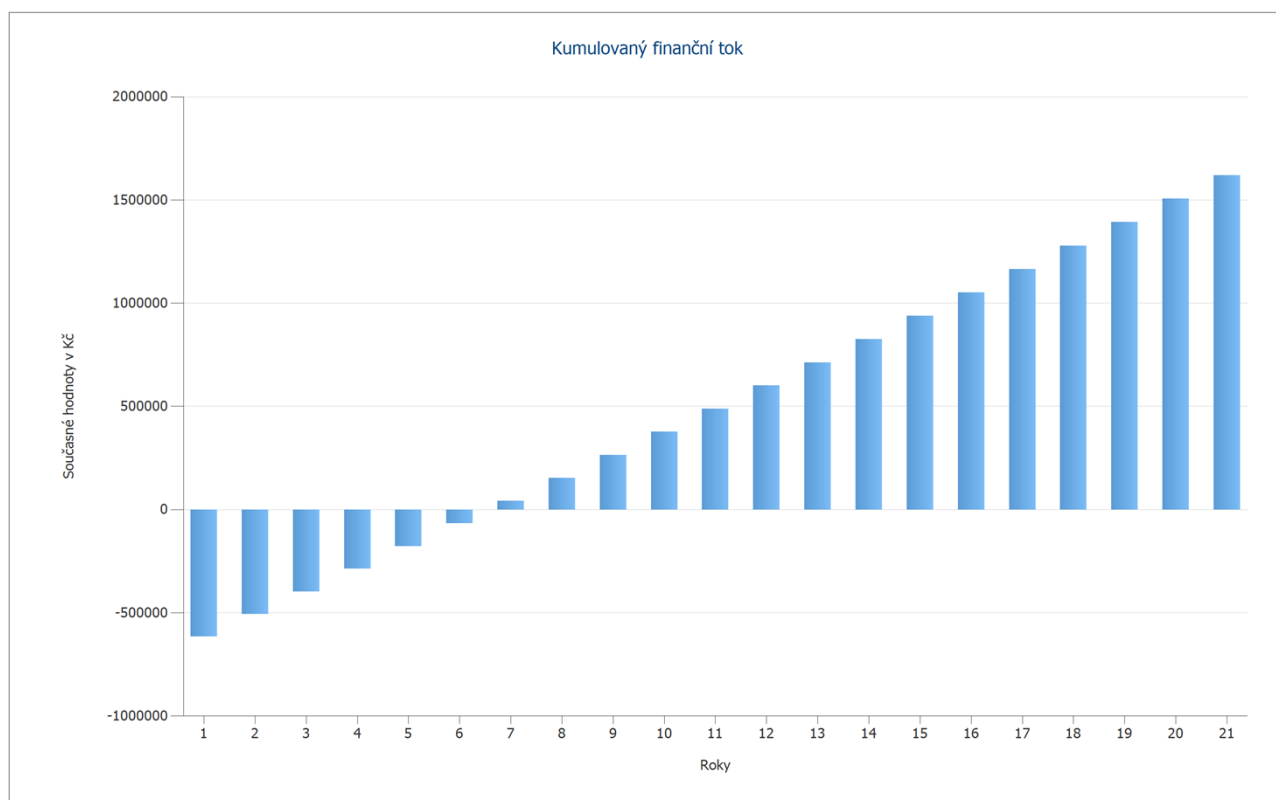
	Rok 16	Rok 17	Rok 18	Rok 19	Rok 20
Investice	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Ostatní náklady	-21 995,11 Kč	-21 777,34 Kč	-21 561,72 Kč	-21 348,24 Kč	-21 136,87 Kč
Podpory	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč	0,00 Kč
Úhrada za nabíjení	11,27 Kč	11,05 Kč	10,83 Kč	10,61 Kč	10,40 Kč
Úspory při odběru proudu	135 112,43 Kč	135 114,23 Kč	135 102,70 Kč	135 077,77 Kč	135 039,10 Kč
Roční finanční tok	113 128,58 Kč	113 347,94 Kč	113 551,80 Kč	113 740,15 Kč	113 912,63 Kč
Kumulovaný finanční tok	1 051 250,32 Kč	1 164 598,26 Kč	1 278 150,06 Kč	1 391 890,20 Kč	1 505 802,83 Kč

	Rok 21
Investice	0,00 Kč
Ostatní náklady	-20 927,60 Kč
Podpory	0,00 Kč
Úhrada za nabíjení	92,43 Kč
Úspory při odběru proudu	134 986,39 Kč
Roční finanční tok	114 151,23 Kč
Kumulovaný finanční tok	1 619 954,06 Kč

Procenta degradace a zvyšování cen se používají měsíčně za celé období sledování.
To se děje již v prvním roce.

Hybridní fotovoltaická elektrárna s bateriovým úložištěm

Zpracoval(a): Filip Šmatlo



Obrázek: Kumulovaný finanční tok

Katalogové listy

Katalogový list FV modulu

FV modul: AXIpremium AC-290M/60S

Výrobce	AXITEC Energy GmbH & Co. KG
Možno dodat	Ano

Elektrické údaje

Typ buňky	Si monocrystalline
Pouze vhodný transformátor-měnič	Ne
Počet buněk	60
Počet obtokových diod	3

Mechanické údaje

Šířka	992 mm
Výška	1640 mm
Hloubka	35 mm
Šířka rámu	11 mm
Hmotnost	18 kg
Orámováno	Ne

U/I charakteristiky při STC

Napětí v MPP	32,01 V
Proud v MPP	9,06 A
Jmenovitý výkon	290 W
Volnoběžné napětí	39,42 V
Zkratový proud	9,54 A
Zvýšení volnoběžného napětí před stabilizací	0 %

Dílčí charakteristiky zátěže U/I

Zdroj hodnot	Výrobce/vlastní
Ozařování	200 W/m ²
Napětí v MPP při dílčí zátěži	31,22 V
Proud v MPP při dílčí zátěži	1,86 A
Volnoběžné napětí při dílčím zatížení	36,38 V
Zkratový proud při dílčím zatížení	1,93 A

Další

Napěťový koeficient	-114,32 mV/K
Proudový koeficient	3,82 mA/K
Koeficient výkonu	-0,39 %/K
Faktor korekce úhlu	98 %
Maximální systémové napětí	1000 V
Spec. Tepelná kapacita	920 J/(kg*K)
Koeficient absorpce	70 %
Emisní koeficient	85 %

Hybridní fotovoltaická elektrárna s bateriovým úložištěm

Zpracoval(a): Filip Šmatlo

Katalogový list měniče

Střídač: GW25k-DT

Výrobce	GoodWe Solar Inverter
Možno dodat	Ano
Elektrické údaje	
Jmenovitý výkon DC	25,8 kW
Jmenovitý výkon AC	25 kW
Max. výkon DC	32,5 kW
Max. výkon AC	25 kVA
Spotřeba v provozní pohotovosti	0,4 W
Noční spotřeba	0 W
Napájení od	2 W
Max. vstupní proud	54 A
Max. vstupní napětí	1000 V
Jmenovité napětí DC	640 V
Váze napájení	3
Počet DC vstupů	6
S transformátorem	Ne
Změna stupně účinnosti při odchylce vstupního napětí od jmenovitého napětí	0,2 %/100V
MPP Tracker	
Rozsah výkonu < 20 % jmenovitého napětí	99,9 %
Rozsah výkonu > 20 % jmenovitého napětí	99,9 %
Počet MPP Tracker	2
Max. vstupní proud pro MPP Tracker	27 A
Max. vstupní výkon pro MPP Tracker	22,95 kW
Min. napětí MPP	260 V
Max. napětí MPP	850 V

Katalogový list bateriového systému

Systém baterií: B-Box 13.8 (13.8 kWh) + SMA Sunny Island 6.0H

Výrobce	BYD Company Ltd.
Jmenovitý výkon	5,3 kW
Maximální výkon nabití (30 min)	5,3 kW
Maximální vybíjecí výkon (30 min)	5,3 kW
Baterie	1 x B-Box 13.8
Výrobce baterie	BYD Company Ltd.
Kapacita	269,53 Ah
Systémové napětí baterie DC	51,2 V

Zpracoval(a): Filip Šmatlo

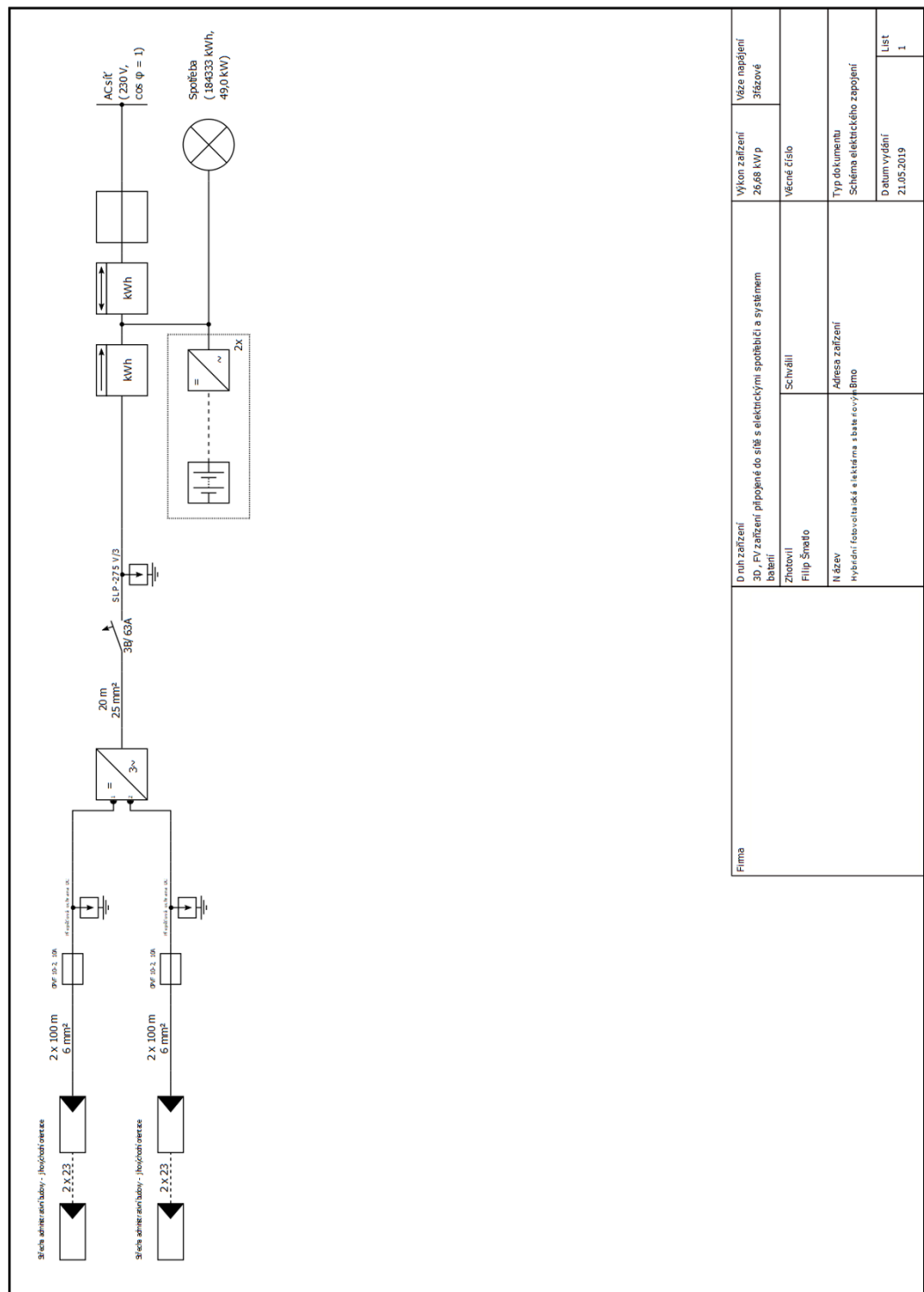
Katalogový list baterie

Baterie: B-Box 13.8

Výrobce	BYD Company Ltd.
Možno dodat	Ne
Mechanické údaje	
Počet buněk v řadě	16
Délka	478 mm
Šířka	483 mm
Výška	130 mm
Hmotnost	34 kg
Elektrické údaje	
Samočinné vybíjení	1,5 %/Měsíc
Jmenovité napětí	51,2 V
Vnitřní odpor	3 mOhm
Životnost v cyklech nabíjení/vybíjení	15000
Typ	
Battery Type	Lithiumiontové
Active material	Lithium-železo-fosfát

Výkresy

Schéma elektrického zapojení

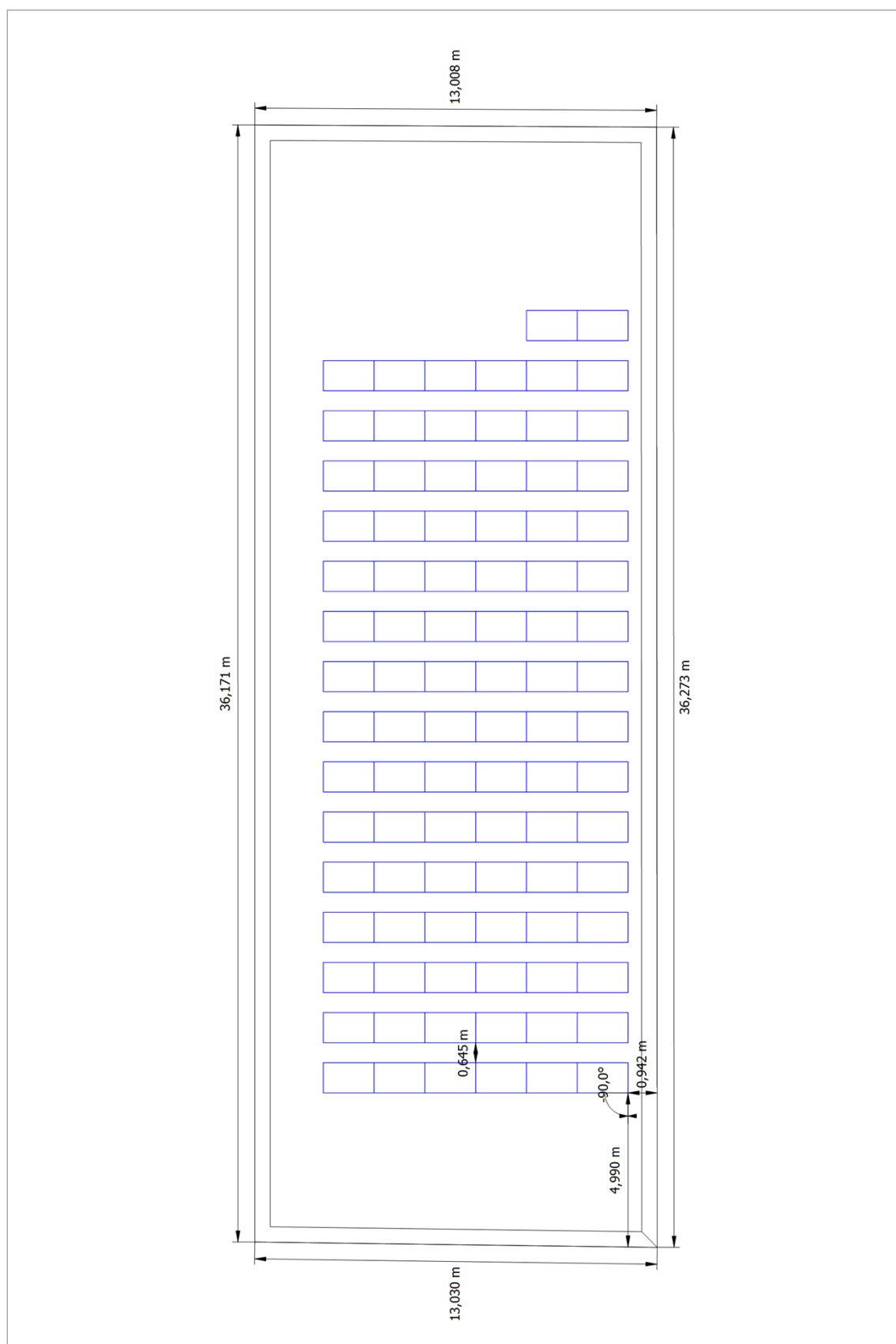


Obrázek: Schéma elektrického zapojení

Hybridní fotovoltaická elektrárna s bateriovým úložištěm

Zpracoval(a): Filip Šmatlo

Rozměrový výkres



Obrázek: Administrativní budova-Mounting Surface Southwest